

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Biologie

Studijní obor: Antropologie a genetika člověka



Mgr. Markéta Čechová

Klasifikace pohlaví na základě vnější i vnitřní morfologie čelní kosti:
aplikace ve forenzních vědách a v bioarcheologii

Sex classification using external and internal morphology of frontal bone:
application in forensic science and bioarcheology

Diplomová práce

Školitelka: doc. RNDr. Jana Velemínská, Ph.D.

Konzultant: prof. RNDr. Jaroslav Brůžek, CSc.

Praha 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 14. 8. 2017

.....

Podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala především své školitelce doc. RNDr. Janě Velemínské, Ph.D. za trpělivost, odborné vedení a cenné rady. Děkuji také konzultantovi prof. RNDr. Jaroslavu Brůžkovi, CSc. za podnětné připomínky, Mgr. Jánů Dupejovi za technickou pomoc a rady ohledně statistického zpracování, jakožto též celému kolektivu laboratoře 3D zobrazovacích a analytických metod. V neposlední řadě patří dík mé rodině za bezmeznou podporu během celého studia.

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývala hodnocením pohlavního dimorfismu vnější i vnitřní morfologie čelní kosti. Studium pohlaví na základě vnějšího povrchu čelních kostí, objemu a povrchu čelních dutin bylo prováděno za využití metod geometrické morfometrie, které byly aplikovány na trojrozměrné modely vytvořené segmentací a úpravou souboru CT snímků hlav 103 jedinců současné české populace.

První část analýzy byla věnována hodnocení formy a tvaru vnějšího povrchu čelní kosti. Metodologie vychází ze studie Musilové et al. (2016), která se úspěšně zabývala pohlavním dimorfismem exokraniálního povrchu celé lebky a jeho základě navrhuje predikční model. Na 3D virtuálních modelech čelních kostí byla pro formu i tvar hodnocena variabilita a testovány rozdíly mezi muži a ženami. Hlavním cílem diplomové práce byla klasifikace pohlaví. Nejúspěšnější klasifikační model dosáhl 86,41 % s využitím 20 hlavních komponent formy vnějšího povrchu čelní kosti.

Další část práce se týkala klasifikace pohlaví pomocí metodologie navrhované Bulutem et al. (2016), jež byla aplikována na tureckou populaci. Metoda klasifikovala pohlaví u českých mužů a žen s úspěšností 70,87 %. Pro kompletnost odhadu pohlaví na základě čelní kosti byla provedena také klasifikace na základě poloměru křivosti čelní kosti, která úspěšně predikovala pohlaví ze 77,66 %.

Pozornost byla také věnována studiu pohlavního dimorfismu čelních dutin. Byly prokázány statisticky významné rozdíly mezi muži a ženami. Na základě objemu a povrchu čelních dutin bylo klasifikováno pohlaví s 64,07% úspěšností po crossvalidaci.

Na závěr bylo ověřeno, zda současné využití čelních dutin a čelní kosti zvýší správnost klasifikace. V případě formy vnějšího povrchu čelní kosti došlo ke zlepšení celkové úspěšnosti nejlepšího klasifikačního modelu o 2,92 %. Při použití tvaru vnějšího povrchu čelní kosti se zvýšila úspěšnost celková o 6,79 %, ale také po crossvalidaci o 0,97 %.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bioarcheologie, čelní kost, čelní dutiny, forenzní antropologie, geometrická morfometrie, odhad pohlaví, pohlavní dimorfismus, 3D zobrazovací metody

ABSTRACT

This master's work was focused on the assessment of sexual dimorphism of external and internal morphology of frontal bone. Sexual diagnosis based on external surface of frontal bones and volume and surface of frontal sinuses was carried out using geometric morphometrics methods. Our approach used anonymized CT scans of 103 skulls from recent Czech population, from which 3D models of frontal bones and frontal sinuses were created.

At first the analysis was aimed at studying form and shape of external surface of frontal bone. Our methodology is based on the work of Musilová et al. (2016) that estimates sex using exocranial surface of the entire skull. We analyzed variability and tested differences in males and females frontal bones. The main target of this work was sex classification. The highest success rate acquired 86,41 % with the first 20 main components of form.

The following part of this study was focused on sex estimation using the methodology developed by Bulut et al. (2016), which was applied in Turkish population. This method classified Czech males and females with accuracy 70,87 %. In order to complete sex determination based on the frontal bone we also used classification of the radius of the frontal bone curvature with success rate of 77,66 %.

The attention was also paid to studying sexual dimorphism of frontal sinuses. Differences between sexes were significant in volume and surface of frontal sinuses. After crossvalidation sex estimation was validated with 64,07 % of accuracy.

At the end we tested the prediction of sex using frontal bone and frontal sinuses together. In the case of studying the form of external surface of frontal bone the best classification model got better result by 2,79 % of the total success rate. After studying the shape of frontal bone the total success rate increased by 6,79 % and after the crossvalidation by 0,97 %.

KEY WORDS

Bioarcheology, frontal bone, frontal sinuses, forensic anthropology, geometric morphometrics, sex estimation, sexual dimorphism, 3D methods

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1	Pohlavní dimorfismus.....	10
2.1.1	Odhad pohlaví.....	11
2.1.2	Postkraniální skelet – pohlavní dimorfismus a odhad pohlaví	13
2.2	Lebka – pohlavní dimorfismus a odhad pohlaví	15
2.2.1	Morfoskopické metody	18
2.2.2	Morfometrické metody	19
2.3	Čelní kost a odhad pohlaví	23
2.3.1	Morfologie čelní kosti	23
2.3.2	Čelní dutiny	25
2.3.3	Osifikace čelní kosti.....	26
2.3.4	Odhad pohlaví na základě čelní kosti.....	28
2.3.5	Odhad pohlaví na základě čelních dutin	31
3	CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY	33
4	MATERIÁL	34
5	METODY.....	35
5.1	Úprava materiálu	35
5.2	Analýza vnějšího povrchu čelní kosti	37
5.2.1	Coherent point drift/dense correspondence analýza (CPD/DCA)	37
5.2.2	Analýza hlavních komponent (PCA)	38
5.2.3	Hodnocení signifikance	38
5.3	Analýza čelních dutin	39
5.4	Klasifikace pohlaví	39
5.4.1	Klasifikace pohlaví pomocí Support vector machine.....	39
5.4.2	Využití metody Buluta et al. (2016) a poloměru křivosti pro klasifikaci pohlaví.....	40
6	VÝSLEDKY	41

6.1	Analýza vnějšího povrchu čelní kosti	41
6.1.1	Hodnocení variability čelních kostí pomocí PCA.....	41
6.1.2	Hodnocení pohlavního dimorfismu vnějšího povrchu čelní kosti	51
6.2	Analýza čelních dutin	60
6.2.1	Analýza objemu čelních dutin.....	60
6.2.2	Analýza povrchu čelních dutin	61
6.3	Klasifikace pohlaví	62
6.3.1	Klasifikace pohlaví na základě vnějšího povrchu čelní kosti.....	62
6.3.2	Klasifikace pohlaví pomocí metody Buluta et al. (2016) a poloměru křivosti čelní kosti	65
6.3.3	Klasifikace pohlaví na základě čelních dutin	66
6.3.4	Klasifikace pohlaví na základě čelní kosti a čelních dutin	66
7	DISKUZE	70
8	ZÁVĚR.....	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	79
	SEZNAM TABULEK.....	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	91

1 ÚVOD

Zkoumání kosterních nálezů a jejich identifikace je základním úkolem forenzní antropologie a bioarcheologie. K údajům, které je potřeba studiem kostry zjistit, patří pohlaví, věk v době smrti, výška postavy a etnická příslušnost. Společně tvoří základní čtveřici informací nutných pro biologickou identifikaci jedince. Odhad pohlaví je jedním z prvních a nejdůležitějších kroků antropologické analýzy (Ferembach et al., 1980; Spradley & Jantz, 2011). S nejvýraznějšími intersexuálními rozdíly se setkáváme zejména na páni. Pánevní kosti jsou označovány jako nejspolehlivější indikátor pro predikci pohlaví díky výrazným projevům znaků pohlavního dimorfismu a nízké populační specifitě (Bruzek, 2002; Bruzek & Murail, 2006). Nicméně, ne vždy nález obsahuje kompletní kostru, navíc ne v tak zachovalém stavu, aby mohlo být provedeno zkoumání v ideálním rozsahu. V praxi se lze setkat s případy, ve kterých chybí postkraniální kosti, nebo jsou přítomny, avšak jsou znehodnoceny nebo fragmentarizovány (Spradley & Jantz, 2011). Oproti páni mají morfologické znaky na lebce sice menší míru projevu pohlavního dimorfismu a jsou populačně specifické, ale zato je lebka více rezistentní a lépe se zachová (Kemkes-Grottenthaler, 2001; Gapert et al., 2009b; Spradley & Jantz, 2011). Existuje mnoho metod, které využívají lebku za účelem klasifikace pohlaví. Podle užívaných technik se můžeme setkat s postupy morfoskopickými nebo morfometrickými. V souvislosti s pokrokem a rozvojem možností se do popředí dostávají také metody geometrické morfometrie a trojrozměrné metodologické přístupy. To však neznamená, že by se tradiční metodologie dostala do ústraní. Původní i nové metody mají svá pro i proti a jejich výběr záleží na okolnostech použití a specifikách případu.

Lebku lze zkoumat z hlediska sexuální diagnostiky jako celek nebo je možné zaměřit se jen na její část. Čelní kost představuje strukturu, která nese významné pohlavně dimorfní znaky (Walker, 2008; Dempf & Eckert, 2010; Shearer et al., 2012). Pohlavní dimorfismus čelní kosti lze sledovat na základě vizuálního hodnocení (např. Krogman, 1962; Lewis & Garvin, 2016), rozměrů (např. Shearer et al., 2012), množiny landmarků (např. Bigoni et al., 2010; Perlaza, 2014), křivek (Hochstein, 2014) nebo povrchu exokrania (Musilová et al., 2016; Bulut et al., 2016), popřípadě v kombinaci s endokraniem (Fatah et al., 2014). Rovněž čelní dutiny vykazují signifikantní rozdíl mezi pohlavími. Nejčastěji jsou sice využívány k individuální identifikaci, ale díky své odolnosti vůči traumatu a vysoké pravděpodobnosti zachování struktury při rozčlenění či spálení těla

během hromadných katastrof a havárií, by mohly hrát důležitou roli též při odhadování pohlaví (da Silva et al., 2009; Michel et al., 2015).

Pohlavnímu dimorfismu čelní kosti a čelních dutin se věnuje řada autorů a z obdobných důvodů je také tématem předkládané diplomové práce. Prvním cílem je hodnocení pohlavního dimorfismu a klasifikace pohlaví na základě formy a tvaru vnějšího povrchu čelní kosti s využitím podobné metodologie, kterou Musilová et al. (2016) aplikovala na exokraniální povrch celé lebky a dosáhla úspěšnosti odhadu pohlaví více než 90 % po leave-one-out crossvalidaci. Dále otestování neladmarkové metody navržené Bulutem et al. (2016) při klasifikaci pohlaví jedinců české populace. Pro kompletnost možností predikce pohlaví na základě čelní kosti také využití poloměru křivosti povrchu čelní kosti jako další proměnné vhodné pro klasifikaci. V poslední řadě pak též klasifikace pohlaví na základě objemu a povrchu čelních dutin, a ověření, zda současné využití čelních dutin a čelní kosti zvýší úspěšnost klasifikace.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Pohlavní dimorfismus

Pohlavní dimorfismus (PD) lze vnímat jako veškeré rozdíly mezi pohlavími téhož biologického druhu. Vyskytuje se v menší či větší míře také u savců, u člověka se nejvíce podobá vyšším primátům. Evoluce ve svém průběhu přinesla změny týkající se právě i tohoto jevu, a to směrem k redukci velikostního pohlavního dimorfismu. U dnešních populací je proto sice méně výrazný než u našich předků, ale i tak není zdaleka zanedbatelný (Fraye & Wolpoff, 1985). Již Darwin se domníval, že většina pohlavního dimorfismu je způsobena pohlavním výběrem, ve kterém evoluční síly působí odděleně na pohlaví (Darwin, 1872). Nedávné studie zpochybnily samotný význam pohlavní selekce (Roughgarden et al., 2006). Některé případy sexuálního dimorfismu jsou totiž nejlépe vystiženy přírodním výběrem (Andersson, 1994). Vzniká názor, že stupeň pohlavního dimorfismu je důsledkem rozdílu mezi součtem všech selektivních tlaků (přirozený a pohlavní výběr), které postihují mužské pohlaví, a součtem těch, které postihují ženy (Ralls & Mesnick, 2009). Změny pohlavního dimorfismu mohou být rovněž vyvolány působením ekologických sil (Slatkin, 1984). Odlišnost tvaru a velikosti spolu s genetickými rozdíly ukazují na dlouhodobý selekční proces, při kterém muži a ženy, každý však jiným způsobem, reagovali na reprodukční, ekonomické a sociální selekční faktory. Projevy pohlavního dimorfismu jsou podmíněny geneticky, jsou však variabilní a mohou být značně ovlivněny prostředím, například též nutričními faktory (Fraye & Wolpoff, 1985; White & Folkens, 2005). Také kultura zastává významné místo mezi činiteli působícími na sexuální dimorfismus u člověka. Má zásadní vliv na procesy uplatňující se při jeho formování. Kultura stanovuje pravidla a normy pro přístup k sexuálním partnerům, udává reprodukční vzorce (počet dětí, věk rodičů při narození prvního potomka), předkládá ideál sexuálního partnera a způsob jeho výběru a modifikuje tak vrozené podklady sexuální selekce (Malina et al., 2009).

Pohlavní dimorfismus je u některých živočichů zřetelný jen v pohlavním ústrojí, avšak u jiných se projevuje i v ostatních znacích. Lidský druh vykazuje sexuální dimorfismus ve tvaru, velikosti a chování. Obecně je známo, že muži mají v průměru vyšší postavu než ženy, robustnější lebeční a obličejové rysy, mají větší zuby, jsou silnější a rychlejší. Muži mají také poměrně větší množství svalových vláken, ženy zase ukládají

více tuku. Obě pohlaví se liší též v hladinách hormonů a růstové rychlosti. Většina zmíněných rozdílů se však nevyskytuje u dětí, ale jsou typické až v dospělosti. Tento fakt souvisí s hormonálním působením v období puberty, jelikož rozdíly ve stavbě těla ovlivňuje působení pohlavních steroidních hormonů. (Fraye & Wolpoff, 1985; Wood & Eagly, 2002; Wells, 2007; Ralls & Mesnick, 2009).

Sexuální dimorfismus lidí může být chápán různými způsoby. V prvním případě se jedná o pohlavně dimorfní znak plně rozvinutý u dospělého jedince. Druhou možností je jeho chápání jako ontogenetického procesu, jehož výsledkem je právě onen dimorfní znak dospělého. Přítomnost pohlavně dimorfních znaků dospělého jedince je nezpochybnitelná, avšak vývojové aspekty už tak jasné nejsou (Bulygina et al., 2006). Příčiny pohlavního dimorfismu mohou být bezprostřední (*proximate*) a prvotní (*ultimate*). Modely vysvětlující bezprostřední příčiny objasňují dimorfismus jednotlivých znaků na anatomické a fyziologické rovině v průběhu ontogeneze. Zaměřují se na změnu prostředí a nutričních podmínek během růstu jedince. Zatímco modely prvotních příčin objasňují pohlavní dimorfismus v genetické adaptaci na ekologické, sociální nebo ekonomické podmínky prostředí. Sledují rozdíl v selekčním tlaku, který během evolučního vývoje působil na jednotlivá pohlaví (Fraye & Wolpoff, 1985)

2.1.1 Odhad pohlaví

Stanovení biologického profilu je nezbytným úkolem na poli jak forenzní antropologie, ale také paleoantropologie, paleodemografie i bioarcheologie. Odhad pohlaví je zásadním úkonem při zkoumání veškerých lidských kosterních pozůstatků nalezených ve forenzním nebo archeologickém kontextu (Ferembach et al., 1980; Guyomarc'h & Bruzek, 2011; Ščesnaite-Jerdiakova et al., 2015). Představuje jeden z prvních kroků procesu identifikace, jelikož je základním poznatkem, od kterého se odvíjí zjišťování dalších demografických údajů (Blau & Ubelaker, 2009; Bidmos et al., 2010).

Úspěšnost odhadu pohlaví ovlivňuje variabilita v rámci populace (Bejdová et al., 2013; Bejdová et al., 2017), ale také variabilita mezi populacemi. Některé populace vykazují vysoký pohlavní dimorfismus, jiné naopak nesou malé mezipohlavní rozdíly. Existence odlišností ve stupni projevu pohlavního dimorfismu, může způsobit chybnou klasifikaci pohlaví. Z toho důvodu je nutné znát pohlavní dimorfismus dané populace, aby mohla být použita vhodná metodologie (White & Folkens, 2005; Blau & Ubelaker, 2009; Dirkmaat, 2012; Kotěrová et al., 2016). Avšak i variabilita uvnitř jedné populace může

způsobit obtížnou sexuální diagnostiku. Rozložení znaků, které se při odhadu pohlaví využívají, je totiž kontinuální a překrývá se. Mezi jednotlivými kategoriemi neexistuje žádná hranice, která by od sebe přesně obě skupiny oddělovala. Na jedné straně jsou sice krajní mužské znaky a na druhé krajní ženské, ale to neznamená, že někteří jedinci nemohou vykazovat charakteristiky typické spíše pro opačné pohlaví (Dirkmaat, 2012).

Dalším faktorem, který má vliv na úspěšnost sexuální diagnózy, je kompletnost kosterních pozůstatků, jejich zachovalost a fragmentarizace. Celý zachovalý skelet umožňuje odhadnutí pohlaví s vysokou mírou spolehlivosti. Jestliže jsou k dispozici jen jednotlivé části kostry, úspěšnost se snižuje (Krogman, 1962; Işcan, 2005). Poměrně často jsou nálezy zlomkovité důsledkem působení přírodních vlivů, katastrof nebo činností mrchožroutů (Kemkes-Grottenthaler, 2001). Při hromadných neštěstích mohou být kosti roztržštěné či spálené. V takových případech se klasifikace pohlaví stává mnohem náročnější oproti studiu celého skeletu (Işcan, 2005; Kranioti et al., 2009). Proto je důležité umět získat informace o pohlaví analýzou jednotlivých kostí nebo jejich částí (Ramadan et al., 2010). S nejvýraznějšími intersexuálními rozdíly se setkáváme zejména na pánvi, nicméně nacházejí se poměrně často také na lebce či v jiných částech postkranálního skeletu (Bruzek & Murail, 2006; Özer et al., 2014).

V případě odhadu pohlaví z nedospělé kostry je sexuální diagnostika velmi obtížná. Sekundární pohlavní znaky nejsou totiž plně vyvinuté, jelikož se jedná o důsledek hormonálních změn probíhajících během puberty. Věk dožití má tedy zásadní vliv na správnost odhadu. Největší úspěšnosti lze dosáhnout až po dokončení vývoje jedince (Blau & Ubelaker, 2009; Black & Ferguson, 2011). Přesto, očníce, mandibulární úhel a brada, jsou pravděpodobně vázané na pohlaví už i u dětí, a mohou být tedy užitečné pro klasifikaci pohlaví podle juvenilní lebky. Výsledky vyvinutých technik však nemají potřebnou spolehlivost (Molleson et al., 1998). U kosterních pozůstatků, které nenesou rozvinuté pohlavně dimorfní znaky, je vhodnější využít analýzu DNA (Stone et al., 1996; Ščesnaite-Jerdiakova et al., 2015).

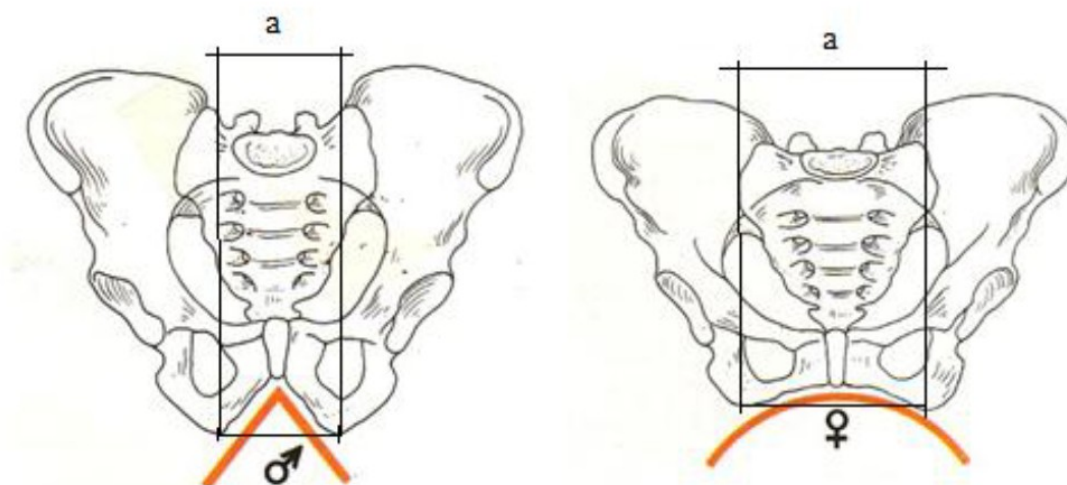
Proces identifikace z kosterních pozůstatků vyžaduje aplikování metodologických přístupů, jejichž vhodnost používání je prokázána. Je nezbytné, aby metody byly přesné a spolehlivé. Tyto dvě vlastnosti nelze zaměňovat. Přesnost je procentuální vyjádření počtu koster, které byly v daném vzorku při vypracovávání metody správně zařazeny. Spolehlivost je dána testováním postupu v nezávislé populaci. Týká-li se identifikace forenzních případů spojených s právními důsledky, vyžaduje se vyšší míra spolehlivosti

než v ostatních situacích. Vyžadována je spolehlivost minimálně 95 %, ačkoliv běžně se pohybuje okolo 85 %. V případě, že zachování kosterních pozůstatků brání dosažení potřebné úrovně, výsledkem je odhadnutí pohlaví s určitým stupněm pravděpodobnosti. Míra chybovosti musí být stanovena a zdůrazněna ve znaleckém posudku (Bruzek & Murail, 2006).

2.1.2 Postkraniální skelet – pohlavní dimorfismus a odhad pohlaví

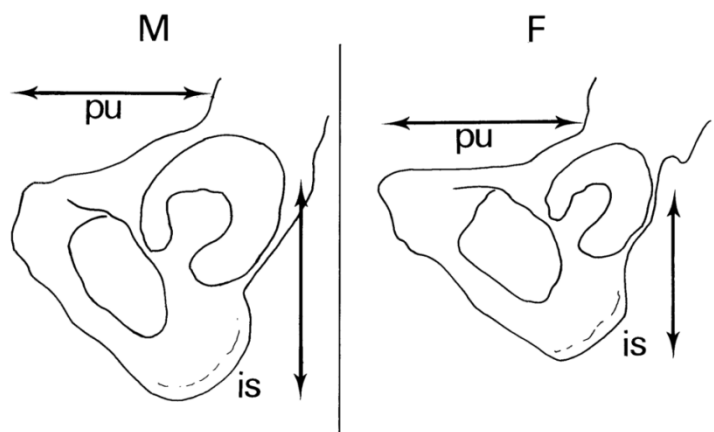
Postkraniální skelet je rovněž nositelem pohlavně dimorfních znaků. Nejvýraznější intersexuální rozdíly se nachází na pánvi. Pánevní kosti jsou jednoznačně nejspolehlivějším indikátorem pro predikci pohlaví, nicméně i další části postkraniálního skeletu jsou také sexuálně dimorfní (Bruzek & Murail, 2006; Özer et al., 2014).

Mužská i ženská pánev poskytuje oporu vnitřním orgánům, ale také kloubům nesoucím váhu těla. Mezipohlavní odlišnosti pánve jsou důsledkem faktorů genetických, ale také vnějších. Ženská pánev se vyznačuje růstem sedacích hrbolů laterálnějším směrem, výraznějším růstem horní větve stydké kosti a širokým, tupým subpubickým obloukem (Šmahel, 2001). Rozdíly v subpubické oblasti souvisí s tvarem pánevního vstupu a s anatomií urogenitálního traktu (Bruzek, 2002).



Obrázek 1. Zobrazení pohlavního dimorfismu na pánvi (vlevo mužská, vpravo ženská), a – laterální posun sedacích hrbolů u žen (upraveno podle Čihák, 2011).

Pohlavní rozdíly v ischiopubických proporcích jsou odrazem přizpůsobení ženské pánve k porodu a vedou k přeměně kostěné pánve během puberty. Tyto změny lze pozorovat v poměru délky stydké a sedací kosti (Bruzek, 2002).



Obrázek 2. Proporce ischiopubického segmentu (M - muži, F - ženy), znázornění většího růstu horní větve stydké kosti u žen.

Velký sedací zářez je u žen velmi široký, ve tvaru písmene U, a u mužů naopak úzký, ve tvaru písmene V (Ferembach et al., 1980). Jeho tvar však není příliš spolehlivým indikátorem pohlaví v důsledku řady faktorů. Nejen, že je ovlivněn celkovou velikostí pánve nebo vývojem okolních struktur, ale také má tendenci zúžení u žen trpících osteomalacií, která vede k měknutí kostí a deformitám (Buikstra & Ubelaker, 1994; Bruzek, 2002). Tvar velkého sedacího zářezu se mění s věkem (Bruzek & Murail, 2006). U žen je však méně variabilní a homogennější v důsledku reprodukčních tlaků na morfologii pánve, což způsobuje častější chybovost klasifikace pohlaví u mužů (Velemínská et al., 2013). Pánev člověka v sobě také nese znaky přizpůsobení se bipedii. Mužská pánev je lépe adaptovaná na lokomoci, avšak ženská se musela podrobit kompromisu mezi pohybem po dvou končetinách a potřebami porodu s ohledem na bezpečný průchod hlavičky s velkým mozkem. Vztah pánve a samotné pánevní kosti s reprodukcí a lokomocí není populačně specifický, což z ní činí nejspolehlivější a nejúspěšnější indikátor pohlaví (Bruzek, 2002; Bruzek & Murail, 2006; Simpson et al., 2008; Özer et al., 2014).

Metody odhadu pohlaví na základě pánevních kostí pracují jak s vizuálním hodnocením, tak používají měření. Vhodné je sledovat pánevní kost jako celek, avšak některé techniky se zaměřují jen na její určitou část. Například Phenice (1969) navrhl metodu spočívající v morfoskopické analýze stydké kosti. Pozorování jednoho segmentu však vede k populační specifitě výsledku, což je i případ zmíněné metodologie. Testování ukázalo, že její spolehlivost se pohybuje v rozmezí od 60 do 90 % v závislosti na zkoumané populaci (Buikstra & Ubelaker, 1994; Bruzek & Murail, 2006). Naopak tvar

velkého sedacího zářezu je populačně nespecifický. Navíc, použitím geometrické morfometrie lze dosáhnout oproti tradičním metodám vyšší úspěšnosti odhadu, a to až 92 % (Gómez-Valdés et al., 2012; Velemínská et al., 2013). Kombinace hodnocení všech částí vypovídá o pohlavním dimorfismu pánevní kosti jako celku. Na tom je založeno doporučení navržené v roce 1980, které přiřazuje 11 znakům, z nichž každý má svoji váhu, stupeň sexualizace od -2 (hyperfeminní) do +2 (hypermaskulinní). Výstupem metody je pak index sexualizace, jehož výsledek vede k odhadu pohlaví (Ferembach et al., 1980). Brůžek (2002) se svou metodou odhadu pohlaví z pánevních kostí snaží eliminovat subjektivitu vizuálního hodnocení, ovlivněnou také kupříkladu zkušenostmi hodnotitele. Navíc metoda zvyšuje potenciál klasifikace pomocí izolovaných fragmentů pánevní kosti. Na základě všech pěti použitých znaků byla stanovena správná diagnóza v 95 %. Podobně vysoké přesnosti pak bylo dosaženo také při použití populačně specifického vzorce funkční analýzy 7 pánevních rozměrů (Steyn & Patriquin, 2009) nebo aplikaci metody DSP, pravděpodobností pohlavní diagnostiky (Murail et al., 2005; Mestekova et al., 2015).

V souvislosti pohlavního dimorfismu s postkraniálním skeletem hraje pánev hlavní roli. Nicméně, ne vždy je pánevní kost, anebo také lebka, k dispozici. Poté přicházejí na řadu ostatní kosti postkraniálního skeletu, které je také možné k odhadu pohlaví využít. Celá řada autorů se zabývá studiem klasifikace pohlaví pomocí téměř všech kostí kostry. Dobré výsledky, avšak populačně specifické, vykazují metody založené na loketní, stehenní nebo holenní kosti (například Kranioti et al., 2009; Ramadan et al., 2010; Dangar et al., 2012; Lee et al., 2015; Kranioti & Apostol, 2015; Brzobohatá et al., 2015).

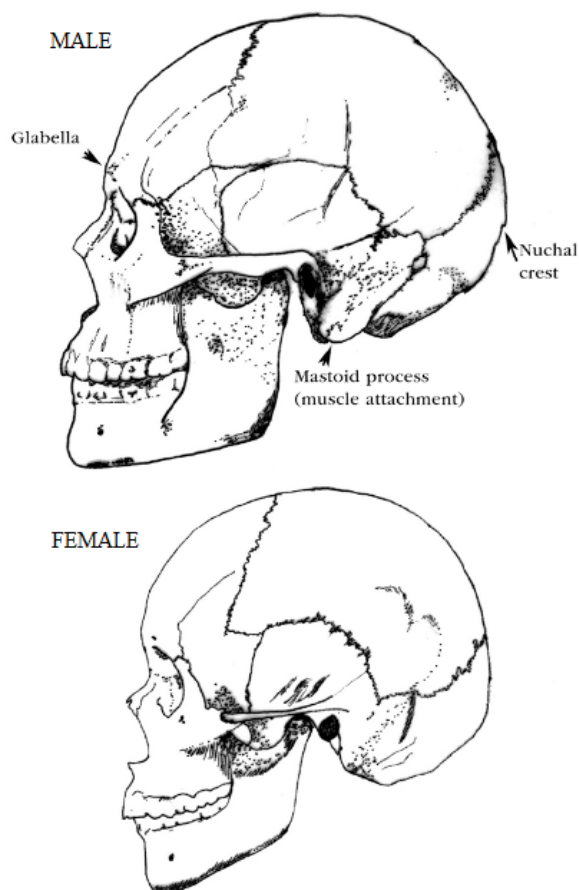
Spradley a Jantz (2011) se ve svém výzkumu pokusili objektivně zhodnotit úspěšnost odhadu pohlaví z postkraniálního skeletu a z lebky. Výsledky ukázaly, že většina postkraniálních struktur svoji úspěšností překonala lebku. Pomocí postkraniálních kostí, včetně pánevní, dosáhla správnost klasifikace pohlaví až 95 %, avšak za použití lebky přesnost nepřesáhla 90 %. Pokud je tedy k dispozici postkraniální kostra, a to zejména pánev, měla by, podle názoru autorů, být v sexuální diagnostice upřednostněna.

2.2 Lebka – pohlavní dimorfismus a odhad pohlaví

Z předchozí kapitoly vyplývá, že nejvhodnějším ukazatelem pohlaví je pánevní kost (například Phenice, 1969; Ferembach et al., 1980; Bruzek & Murail, 2006). Nicméně, lebka má v odhadu pohlaví také svůj význam. Ne vždy je totiž k dispozici kompletní kostra. Někdy chybí větší či menší množství postkraniálních kostí, jindy jsou přítomny,

avšak jejich zachovalost neumožňuje jejich použití, anebo je k dispozici pouze lebka samotná. Morfologické znaky na lebce mají sice menší míru projevu pohlavního dimorfismu a jsou populačně specifické, ale na rozdíl od pánve je lebka více rezistentní a lépe se zachová (Bruzek & Murail, 2006; Gapert et al., 2009a; Spradley & Jantz, 2011; Caple & Stephan, 2016). Někteří autoři poukazují na to, že lebka je druhým nejlepším indikátorem pro posouzení pohlaví (Krogman, 1962; Pickering & Bachman, 2009; Byers, 2015). Spradley a Jantz (2011) však odsouvají lebku až za dlouhé kosti.

Morfologických znaků pro rozlišení ženské a mužské lebky je několik. Celkově je ženská lebka v průměru gracilnější a má spíše kulatější tvar. Muži se vyznačují výraznějším vyklenutím glabely, nadobočních oblouků a *protuberantia occipitalis externa*. Ženy naopak více prominují v oblasti čelních a temenních hrbolů. Mužská lebka je charakterizována také velkým bradavkovitým výběžkem spánkové kosti, vysokou a silně skloněnou lícní kostí či silnějším a vyšším jařmovým obloukem. Ženy mají oproti mužům gracilnější dolní čelist s malou, nepatrně vystupující bradou (Krogman, 1962; Ferembach et al., 1980; Bejdová et al., 2013; Madadin et al., 2015; Bulut et al., 2016; Gamba et al., 2016). Novodobější morfometrické analýzy však naznačují, že brada není až tak sexuálně dimorfní oblastí, jak se předpokládalo dříve (Lewis & Garvin, 2016). *Apertura piriformis* u mužů je vyšší a užší. Mužské očníce jsou vyšší, relativně větší a v porovnání s ženskými mají více zaoblený tvar. Větší týlní kondyly a relativně delší *foramen magnum* jsou rovněž typické pro mužské pohlaví (Krogman, 1962; Ferembach et al., 1980; Williams & Rogers, 2006; Gapert et al., 2009b; Madadin et al., 2017). Pohlavně dimorfní jsou také šířka kondylu nebo vzdálenost mezi kondyly, které se ukázaly jako nejvhodnější indikátory pohlaví z celé řady dalších kondylárních měření (Gapert et al., 2009a; Amores-Ampuero, 2017). Další rozdíl lze nalézt ve velikosti neurokrania, která odráží relativní velikost mozku. Mužský mozek je v průměru větší až o 10 % (Lenroot et al., 2007). To lze doložit také signifikantním rozdílem v objemu endokraniální dutiny (Isaza et al., 2014).



Obrázek 3. Obecné zobrazení pohlavního dimorfismu na lebce – nahoře mužská, dole ženská (upraveno podle Blau & Uberlaker, 2009).

Pohlavní dimorfismus v kraniofaciální oblasti se objevuje časně v postnatálním vývoji. Hormonální rozdíly pak způsobují odlišný vývoj mužů a žen po celý život. Nicméně, výrazným se sexuální dimorfismus stává až v důsledku pubertálních hormonálních změn (Bulygina et al., 2006). Je nutné si uvědomit, že ke změnám dochází nejen během vývoje, ale také vlivem stárnutí na dospělé lebce. Významné změny postihují vnější tvar lebeční klenby. Zejména se jedná o relativní expanzi laterálních částí a kompresi čelní kosti a zadní temenní oblasti. U žen byly shledány menší tvarové změny, avšak u mužů byla nápadnější expanze spánkové, temenní a týlní oblasti (Urban et al., 2014). Věk samozřejmě neovlivňuje pouze mozkovnu, ale má vliv také na obličejovou část. Stárnutí u žen i mužů způsobuje zakulacení a sníženou konvexitu obličeje (Mydlová et al., 2015). Studie sledující souvislost stárnutí a morfologických charakteristik lebky, které se využívají pro odhad pohlaví, však ukázaly, že věk nehraje velkou roli v expresi pohlavně dimorfních znaků. Tvar a velikost lebky se podle některých autorů u obou

pohlaví výrazně liší bez ohledu na jejich věk (Suazo & Zavado, 2012; Osipov et al., 2013; Garvin et al., 2014). Musilová et al. (2016) však našla pokles rozdílů mezi mladší a starší skupinou ve formě i tvaru. Nejvýraznější pokles byl zaznamenán v čelním a týlním regionu.

Metody odhadu pohlaví mohou být morfoskopické nebo morfometrické. V posledních letech zaznamenala velké rozšíření geometrická morfometrie. Na významu nabírají 3D kvantitativní metody.

2.2.1 Morfoskopické metody

Morfoskopické metody jsou vázány na stupeň rozvoje sekundárního pohlavního znaku a tvarové zvláštnosti u příslušného pohlaví. Jsou založeny na pozorování a hodnocení pohlavně dimorfních oblastí (Williams & Rogers, 2006; Walker, 2008; Malina et al., 2009). Měření sice umožňuje shrnout rozměrové prvky dimorfismu, ale existují právě i další atributy, jako velikost, tvar a robusticita, které vytváří podklad pro odhad pohlaví na základě morfologických charakteristik (Buikstra & Ubelaker, 1994). Lebky jednotlivých populací se od sebe vzájemně odlišují (Garvin et al., 2014; Caple & Stephan, 2016). Pro některé skupiny je morfoskopie lebky dobrým základem pro odhad pohlaví, pro jiné ne (Buikstra & Ubelaker, 1994).

Doporučení pro věkovou a sexuální diagnózu, vydané v roce 1980, navrhlo seznam morfologických znaků s pětistupňovou škálou pro jejich hodnocení. Krajiní hodnoty vyjadřují hyperfeminní (-2) a hypermaskulinní (+2) projev. Každému znaku je přiřazena také jejich váha, kterou je vynásoben jednou, dvakrát nebo třikrát, a která odpovídá signifikanci při odhadu pohlaví. Na základě všech hodnot je vypočten celkový odhad pohlaví (Ferembach et al., 1980).

Buikstra a Ubelaker (1994) posuzovali tvar, velikost a robusticitu pěti vybraných pohlavně dimorfních oblastí. Zvolené znaky hodnotí na stupnici od 0 do 5, přičemž 0 znamená neurčené pohlaví (nedostatečná data neumožňující odhad), 1 ženské (není pochyb o tom, že znak představuje ženu), 2 pravděpodobně ženské (struktury jsou spíše ženské než mužské), 3 nejednoznačné pohlaví, 4 pravděpodobně mužské (rysy jsou spíše mužské než ženské) a 5 mužské (není pochyb o tom, že se jedná o mužský znak). Na tuto metodologii navázalo několik autorů. Nejprve byla testována v roce 2008, kdy byla aplikována diskriminační funkční analýza do skórování pěti znaků. Cílem bylo zjištění přesnosti jednotlivých struktur a jejich kombinací. Odhad pohlaví na základě samotné oblasti glabely

ukázal nejlepší výsledky klasifikace na základě jednotlivého znaku (82,6 %). Kombinací všech pěti znaků je však dosaženo větší úspěšnosti (90,1 %) (Walker, 2008). V roce 2014 přišlo na řadu další ověřování, avšak tentokrát ve vztahu k populaci, věku a velikosti těla, které poukázalo na přítomnost populační specificity. Tato studie prokázala populační rozdíly v každém z pěti znaků. Napříč všemi skupinami lidí jsou glabella a bradavkovitý výběžek nejspolehlivějšími ukazateli pohlaví. Věk a postkraniální velikost nemají významný vliv na lebeční struktury (Garvin et al., 2014). Metodologie, tak jak byla navržena Walkerem (2008), je spolehlivá, pokud je přesně dodržován postup. Nejméně chybovosti vykazuje hodnocení glabely, naopak nejčastěji činí problémy bradová eminence (Lewis & Garvin, 2016). Tímto není výčet morfoskopických metod zcela uzavřený, například jiná metodologie, založená na využití 20 znaků, dospěla k 96% úspěšnosti (Williams & Rogers, 2006).

Morfoskopické metody jsou zatíženy značnou subjektivitou. Bylo zjištěno, že pro metody, založené na pozorování, je více rozhodující srozumitelnost definic struktur než jejich počet. Popis některých znaků, např. bez doprovodných obrázků, totiž umožňuje jejich méně přesné subjektivní pochopení. Menší množství přesněji formulovaných rysů může odhad zpřesnit (Walrath et al., 2004). Struktury, jejichž vznik souvisí s činností hlavních svalových skupin, se zdají být nejlepšími ukazateli, jako například bradavkovitý výběžek, dolní čelist nebo týlní oblast (Suazo et al., 2009). Spolehlivost odhadu morfoskopickým posouzením lebky je méně spolehlivá než posouzení z pánevních kostí. Proto je vhodnější využít měření a následně jej porovnat s referenční databází, která obsahuje celosvětovou variabilitu měřených lebek. (Bruzek & Murail, 2006).

2.2.2 Morfometrické metody

Morfometrické metody jsou založeny na měření pohlavně dimorfních oblastí. Hodnotí rozdíly ve velikosti struktury mezi mužem a ženou. Využití kvantitativních znaků předpokládá přínos větší objektivity než poskytují subjektivitou zatížené morfoskopické metody. Objektivita je přinášena díky méně zkreslenému měření. Odhad pohlaví není tolik ovlivněn znalostmi a zkušenostmi antropologa (Bruzek & Murail, 2006; Gapert et al., 2009a; Ousley & Jantz, 2013). Určitou míru subjektivitu zde přesto nalezneme. Pokud je totiž do procesu zkoumání zapojen člověk, nelze ji zcela odstranit (Birkby, 1966).

Nejdůležitější obrat pro kvantitativní metody přišel s pokrokem statistické analýzy. Po vzestupu multivariační statistiky byla navržena řada nových metod založených

na diskriminační funkci (například Gapert et al., 2009a; Ogawa et al., 2013; Lee et al., 2015). Morfometrické metody využívají variabilní počet různých rozměrů a jejich kombinací. Jedná se například o maximální délku lebky, maximální šířku, basion-bregmatickou výšku, bizygomatickou šířku, horní šířku obličeje, bigoniální šířku, nasální šířku. Využívaná je celá lebka, na základě které přesnost odhadu dosahuje zhruba rozmezí 60 – 90 %, v závislosti na populaci a využitě rozměry (například Hanihara, 1959; Giles & Elliot, 1963; Birkby, 1966). Mohou být však použity i její izolované části: dolní čelist (85 %), oblast bradavkovitého výběžku (65 – 71 %), *foramen magnum* (70 %) nebo týlní kondyly (69 – 76 %) (Giles, 1964; Kemkes & Göbel, 2006; Dayal et al., 2008; Gapert et al., 2009b; Madadin et al., 2015). Robinson a Bidmos (2009) ověřovali spolehlivost diskriminačních funkčních rovnic aplikovaných na vybrané rozměry na lebce a zároveň pažní kosti u Afričanů evropského původu. Procentuální přesnost získaná u všech testovaných funkcí se v této studii pohybuje v rozsahu od 72 do 95,5 %. Relativně vysoké úspěšnosti dosáhla analýza thajské populace, která vychází ze 6 měření (maximální lebeční délky, bizygomatické šířky, baurikulární šířky, nasální výšky, biorbitální šířky a pravé mastoidální délky) a rozlišila pohlaví s přesností 90,6 % (Mahakkanukrauh et al., 2015). Tento vysoký výsledek nepředčil ani další výzkum, na jihoindické populaci, který dospěl jen k 77% míře přesnosti (Ramamoorthy et al., 2016).

2.2.2.1 Fordisc

Fordisc je interaktivní počítačový program určený k forenzní identifikaci kosterních pozůstatků jedince. Byl vyvinutý jako podpora při zjišťování pohlaví, věku, výšky a původu. V roce 1993 byl zpřístupněn Fordisc 1.0, který klasifikuje neznámou lebku dospělého na základě známých vzorků s použitím až 21 měření lebečních znaků. Data pochází z velké části z forenzní databanky (Forensic Data Bank), která zaznamenává informace o recentních populacích ze skutečných forenzních případů. Tato verze přinesla flexibilní systém, který umožňoval přizpůsobení diskriminačních funkcí tak, aby byly využitelné i v případech, kdy je k dispozici jen část měření. Další generace programu, Fordisc 2.0, přinesla zlepšení o několik funkcí. Nově bylo umožněno měření dolních čelistí. Databanka zahrnovala celosvětová kraniální data a byla rozšířena také o postkraniální měření umožňující nejen odhad pohlaví a původu, ale také výšky (Ousley & Jantz, 1998).

Fordisc 3.0 je nejnovější verze tohoto statistického softwaru, který provádí lineární diskriminační funkční analýzu pro odhad pohlaví a původu, a lineární regresi pro zjištění výšky postavy. Poskytuje uživateli komplexní soubor populačních dat, skeletálních měření a statistických analytických metod pro antropologické zkoumání kosterních pozůstatků. Umožňuje také aktualizaci údajů pomocí internetu (Ousley & Jantz, 2013).

Fordisc je široce používán, nicméně, má také svá omezení, a je ho potřeba využívat spolu s dalšími materiály (Uberlaker, 1998). Kontrolní studie ukázala spolehlivost softwaru Fordisc 3.0 pohybující se v rozmezí od 52,7 až 77,8 %. Tento výsledek podporuje nepoužívání programu v evropském forenzním kontextu. Ve Spojených státech bude pravděpodobně lépe použitelný, jelikož většina případů může být srovnávána s forenzní databankou (Guyomarc'h & Bruzek, 2011). Problematičnost Fordiscu a dosahování nízkých úrovní úspěšné klasifikace dokládají i další publikace (Uberlaker et al., 2002; Elliott & Collard, 2009).

2.2.2.2 Metody geometrické morfometrie

Technický pokrok ovlivňuje všechny oblasti vědeckého zkoumání, a jinak tomu není ani u metod odhadu pohlaví. Relativně novým přístupem využívaným ve forenzní antropologii, bioarcheologii, ale také v biomedicínských oborech, je geometrická morfometrie. Jedná se o odvětví statistiky, které kombinuje nástroje geometrie a počítačové grafiky s biometrickými prvky v technikách pro vícerozměrné analýzy biologické tvarové variability. (F. L. Bookstein, 1997). Zahrnuje metody založené na 2D nebo 3D souřadnicích významných bodů, landmarků, které popisují objekt. Známé jsou také přístupy nezávislé na landmarcích, které specifikují tvar pomocí trojúhelníkové sítě, analytické reprezentace křivek a ploch. Geometrická morfometrie umožňuje oddělit velikost a tvar (Slice, 2007).

Kimmerle et al. (2008) zkoumala vliv velikosti a pohlaví na tvar kraniofaciálního komplexu v americké populaci za účelem lepšího pochopení alometrického základu kosterních znaků sloužících pro odhad pohlaví. Výsledky ukázaly, že pohlaví má významný vliv na tvar amerických obyvatel (bělochů i Afroameričanů), zatímco velikost podobný účinek nemá. Menší a větší jedinci v rámci stejného pohlaví si jsou ve tvaru podobní.

Hodnocení pohlavního dimorfismu pomocí trojrozměrných metod geometrické morfometrie ukázal signifikantní rozdíly ve tvaru midsagitálního zakřivení klenby, horní

části obličeje, oblasti nosu, očí a patra. Odlišnosti se naopak nevyskytují ve tvaru lebky jako celku, tvaru spodiny lebeční a neurokrania. Největší přesnost odhadu pohlaví byla nalezena v regionu horní části obličeje (100 %) a ve tvaru midsagitální křivky klenby (99 %) (Bigoni et al., 2010). Klasifikace pohlaví, která byla aplikována na australskou populaci, kombinovala tradiční i geometrickou morfometrii. Pomocí centroid size, tvaru a 13 mezilandmarkových vzdáleností dospěla k úspěšnosti 83,5 % po crossvalidaci (Franklin et al., 2012). Exokraniální povrch lebek vykazuje signifikantní mezipohlavní rozdíly. Na základě jeho formy, byla na francouzské populaci dosažena správná klasifikace pohlaví po leave-one-out crossvalidaci v 90,3 % případů. Po odečtení velikosti, při analýze samotného tvaru, je úspěšnost zhruba o 3 % nižší (Musilová et al., 2016). Využití exokrania společně s endokraniem ještě zvyšuje přesnost klasifikace (Fatah et al., 2014).

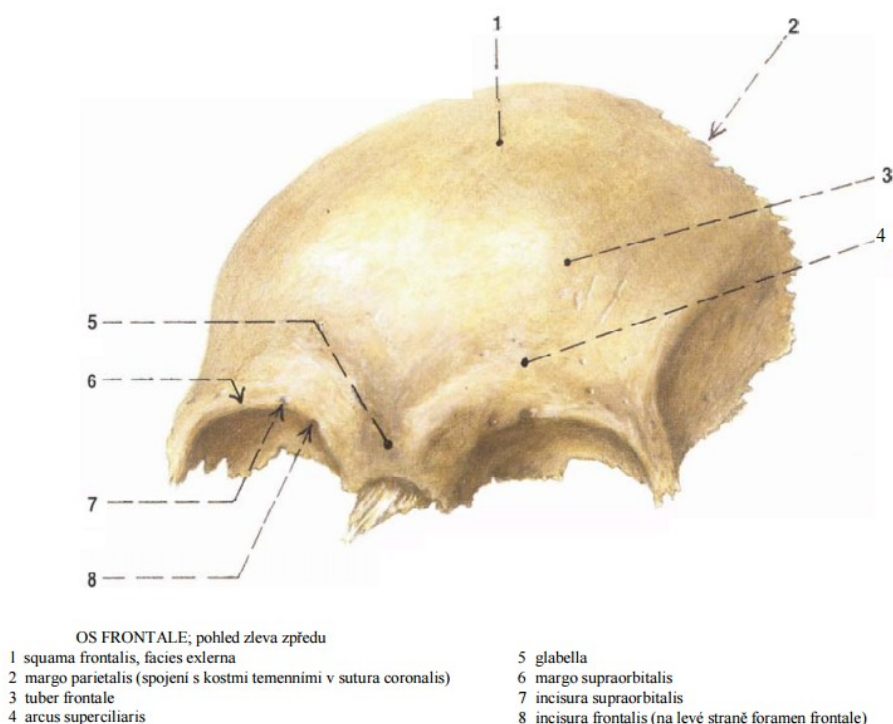
Aplikací geometrické morfometrie v problematice odhadu pohlaví na základě lebky, ale též postkraniálního skeletu, se zabývá nespočet autorů (například Rosas & Bastir, 2002; Kimmerle et al., 2008; Gonzalez et al., 2011; Jantz et al., 2013; Hochstein, 2014). Podrobněji se metodám geometrické morfometrie budu věnovat v praktické části této práce, ve které se zaměřím na specifikaci mnou použitých metod.

2.3 Čelní kost a odhad pohlaví

Čelní kost, *os frontale*, je součástí neurokrania. Tvoří přední část lebeční klenby. Vytváří oblast čela, která sahá od horního okraje očních a kořene nosu, a kraniálně přechází v horní část kalvy. Je jednou z největších a nejrobustnějších kostí lebky. V dospělém věku je zpravidla nepárovou kostí. V 5 – 8 % případů však může zbýt pozůstatek po metopickém švu (*sutura metopica* či *sutura frontalis*) mezi pravou a levou polovinou kosti dospělého, tzv. metopismus (Thorek, 1985; White & Folkens, 2005; Čihák, 2011). Čelní kost je často označována jako znak rodu *Homo* z důvodu velkého počtu charakteristických vlastností, které nese. *Homo sapiens* se vyznačuje redukcí nadobočních oblouků, vertikálním sklonem čelní kosti a zvednutím a rozšířením čelního laloku (F. Bookstein et al., 1999; Albessard et al., 2016).

2.3.1 Morfologie čelní kosti

Celková morfologie čelní kosti je ovlivněna jejím postavením a orientací k ostatním kraniálním složkám, vzhledem nadobočních oblouků a relativní pozicí vůči obličejové části. Čelní kost se skládá ze tří hlavních oblastí, jimiž jsou: *squama frontalis*, *partes orbitales* a *pars nasalis*.



Obrázek 4. Morfologie čelní kosti (upraveno podle Čihák, 2011).

Squama frontalis, šupina kosti čelní, se svou zadní částí spojuje s kostmi temenními prostřednictvím věncového švu (*sutura coronalis*) a kaudálněji na ni pak v *sutura sphenofrontalis* navazují velká křídla klínové kosti. Vyklenutí čelní šupiny je význačným znakem pro recentní populace. Současní moderní lidé jsou charakterizováni tímto větším zaoblením a časní *Homo sapiens* se v tomto rysu od živých populací neodlišují. To naznačuje, že od vývoje časných moderních lidí neproběhly významné evoluční změny. Zbývá však ještě posoudit, zda je tato morfologie spojena se strukturálními změnami celkové lebky nebo se změnami růstu a vývojem přední části mozku. Hypotéz, které se týkají vlivu růstu mozku a mechanických faktorů na formování kosti, je dosud několik. Ačkoliv je vyklenutí čelní šupiny spojeno s moderními lidmi, nedávná studie odhalila mírný stupeň překryvu mezi nimi a nemoderními archaickými lidmi (středně pleistocenním asijským *Homo erectus*, středně pleistocenním druhem *Homo* z Evropy a Afriky – *Homo heidelbergensis*, a neandrtálci). Tento výsledek zpochybňuje předpoklad, že vyklenutí šupiny čelní kosti je jedinečným moderním znakem, což může poskytovat zavádějící závěry v případě, že jsou jedinci klasifikováni na základě samotné této vlastnosti (F. Bookstein et al., 1999; Lieberman et al., 2002; Bruner et al., 2013; Bruner, 2015).

Na vnější ploše se nachází několik významných útvarů, které jsou pro přehlednost uvedeny v následujícím výčtu (White & Folkens, 2005; Čihák, 2011):

- *tubera frontalia*, párové hrboly přibližně uprostřed výšky šupiny, označující umístění osifikačních center,
- *arcus superciliares*, párové nadoboční oblouky nad okrajem očí,
- *glabella*, ploška mezi vyvýšenými nadobočními oblouky,
- *margo supraorbitalis*, horní okraj očníce nesoucí zářezy pro výstupy cév a nervů z očníce – mediálně *incisura frontalis* a laterálně *incisura supraorbitalis*.

Na vnitřní ploše šupiny kosti čelní jsou viditelné otisky cév tvrdé pleny mozkové a stopy po mozkových závitech. Vyskytují se zde také útvary (White et al., 2011; Čihák, 2011):

- otisk žilního splavu *sinus sagittalis superior* kraniálně uprostřed,
- *crista frontalis*, hrana ve střední čáře dole, v níž přechází otisk splavu,
- *foramen caecum*, vkleslina na dolním konci výše zmíněné hrany.

Podle studie prováděné na turecké populaci se v 19 % případů vyskytuje zvýšené ztlustění kosti na endokraniálním povrchu kosti (Govsa et al., 2015).

Párové *partes orbitales* tvoří dolní pokračování šupiny čelní kosti. Zevní hladká strana se při okraji očníce laterálně prohlubuje v jamku pro slzní žlázu (*fossa glandulae lacrimalis*) a mediálně v kladku (*fovea trochlearis*), okolo které zahýbá šlacha horního šikmého očního svalu. Na vnitřní ploše jsou patrné stopy mozkových závitů. Mediální okraje nasedají na čichovou kost, laterálně se pojí s kostmi lícními a dále navazují na velká a malá křídla kosti klínové (White et al., 2011; Čihák, 2011).

Nepárová *pars nasalis* připojuje jednu *pars orbitalis* k druhé. Komunikuje s kostmi nosními a též s horními čelistmi. Uvnitř *pars nasalis* se nachází nepravidelná párová dutina kosti čelní (*sinus frontalis*) rozšiřující se vzhůru a laterálně do šupiny (White & Folkens, 2005; White et al., 2011; Čihák, 2011).

2.3.2 Čelní dutiny

Vedlejší nosní dutiny (*sinus paranasales*) jsou vytvářeny z laterální nosní stěny vychlípěním sliznice, která následně prostupuje do okolních kostí, jejichž spongióza ustupuje a vznikají pneumatizované dutiny. Vedlejší nosní dutiny jsou zakládány časně, jejich vývoj je však dlouhý. U novorozence mají podobu pouze vkleslin nosní stěny, ale v průběhu celého růstového období se zvětšují. Pneumatizace se stává výrazná v pozdním období puberty. V otázce dosažení konečné podoby panují rozdílné názory. Někteří autoři uvádí období okolo vrcholu pubertální růstové akcelerační, jiní pak zmiňují dokončení vývoje až po 20. roce věku (Scheuer & Black, 2004; Duque & Casiano, 2005; Čihák, 2013). *Sinus paranasales* jsou vystlány víceřadým cylindrickým epitelem. Vedlejší nosní dutiny spolu s dalšími strukturami představují prostor umožňující resonanci při tvorbě hlasu, dodávají mu barvu. K vedlejším nosním dutinám patří: dutiny v horních čelistech, v kosti čelní, klínové a čichové (Sargi & Casiano, 2007; Čihák, 2013). Vzhledem ke zpracovávanému tématu se dále budu zabývat jen čelními dutinami.

Dutina v čelní kosti, *sinus frontalis*, se nachází uvnitř čelní kosti mezi poměrně silnou přední a relativně tenkou zadní vrstvou kompaktní kosti. Vyznačuje se nepravidelným vějířkovitým tvarem. Počíná v oblasti glabelly a větví se individuálně různě vysoko směrem do šupiny kosti čelní. Kapacita průměrně činí 15 cm³, avšak individuální variabilita je velká. Párové čelní dutiny od sebe odděluje přepážka, *septum sinuum frontium*. Pravá a levá část se vyvíjí nezávisle na sobě a často vykazuje asymetrii (Duque & Casiano, 2005; Sargi & Casiano, 2007; Čihák, 2013). Dále je pozorována jednostranná

nebo bilaterální aplazie, která se vyskytuje u méně než 10 % osob. Studie na turecké populaci ukázala, že hypoplastické dutiny mají zhruba dvojnásobný výskyt než předchozí varianta. V četnosti zastoupení následuje střední velikost dutin a nejčastějším typem je přítomnost hyperplasie (Pondé et al., 2003; Aslier et al., 2016). Jiná studie však odhalila četnost jednotlivých druhů přesně v opačném pořadí s nejčastějším výskytem malých či absentujících čelních dutin (Cunningham et al., 2016). Přítomnost různých variant vzhledu dutin má souvislost s uzavřením metopického švu či naopak jeho perzistencí. U jedinců, kterým metopický šev zůstal, se výrazně častěji vyskytuje aplasie či hypoplasie, na rozdíl od těch, kterým v dospělosti nepřetržává (Guerram et al., 2014). Vysoká variabilita čelních dutin je patrná též mezi monozygotními dvojčaty (Kjær et al., 2012). Prominence nadobočních oblouků neodráží velikost dutiny (Pondé et al., 2003). *Sinus frontalis* ústí dvěma způsoby. Buď samostatně přímo do středního nosního průchodu, nebo společně s předními čichovými sklípky jako *infundibulum frontoethmoidale* též do středního nosního průchodu (Čihák, 2013).

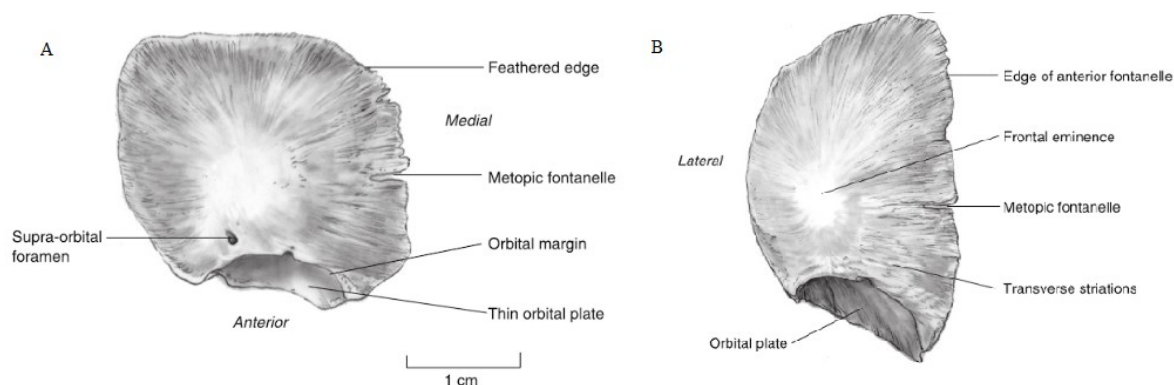
2.3.3 Osifikace čelní kosti

Problematika osifikace čelní kosti byla v minulosti doprovázena mnohými neshodami ohledně počtu center a způsobu osifikace. Každá polovina čelní kosti kostnatí z jednoho osifikačního centra od 8. fetálního týdne. Malé osifikační centrum ve středu obou nadobočních částí je viditelné v 9. intrauterinním týdnu. V 11. týdnu získávají centra oválný tvar a jejich dlouhá osa leží v oblasti nadobočních oblouků. Následně se osifikace šíří mediálně a bočně, takže po 11. týdnu se zformuje nadoboční část. První vlna osifikace je lokalizována pouze v mediální části nadobočních oblouků. Laterální dvě třetiny se začínají spolu s lící kostí vyvíjet později. Dochází tak k oddělování očnice od spánkové jámy. Tento proces ovlivňuje tvorbu *linea temporalis* a štěrbinu pro uchycení membrány anterolaterální fontanely. Pomalu osifikují části očnic, které jsou dokončeny kolem 13. týdne. Část je zesílena a vytváří okraj očnice, který může nést supraorbitální zářez. *Pars orbitalis* je drobná a tenká (Inman & Saunders, 1937; Faro et al., 2005; Cunningham et al., 2016).

Mezi 11. a 20. týdnem se osifikace rozšiřuje od nadobočních oblastí paprskovitě nahoru. Nová kost se jeví jako nepravidelná, roste v ektokranilním směru. Po 11. gestačním týdnu dosáhne čelní kost střední čáry v oblasti nosu a následně se šíří kraniálně k budoucí přední fontanelě. Mezera mezi dvěma čelními kostmi v mediální linii se začíná

uzavírat v nosní oblasti kolem 16. gestačního týdne a pohybuje se vzhůru k přednímu lupínku, kterého dosáhne okolo 28. týdne. Ve 32. týdnu je patrné uzavření metopického švu v supranasálním regionu. Další postupné uzavření je vedeno opět směrem nahoru k přední fontanele (Inman & Saunders, 1937; Faro et al., 2005; Cunningham et al., 2016).

V posledních dvou měsících života plodu se stává kost pevnější. Inferiomedialní úhel kosti, která bude tvořit oblast glabella, vykazuje příčné rýhování, střední hranice je poměrně hladká. Asi v polovině mezi čelním hrbolem a středním krajem může být otvor, jenž je pokračováním štěrby, kterou spojuje právě se středním okrajem. Jedná se o místo metopické fontanely. Více posteriorně je mediální hrana jemně zoubkovaná a svažuje se laterálně a tvoří prostor anteriornímu lupínku. Na laterálním okraji kosti je zaoblený posteriorní úhel. Koronální okraj je pilovitý. Pokud jde o laterální konec nadočnicového okraje, kost je zde zesílená pro spojení s kostí lícni. Laterální část horního okraje oční je ostrá. Mediální třetina je hladká jako u dospělé kosti (Inman & Saunders, 1937; Faro et al., 2005; Cunningham et al., 2016).



Obrázek 5. Vývoj pravé čelní kosti. A – fetální, B – perinatální (upraveno podle Cunningham et al., 2016).

Není jasné, zda nasální část má oddělené sekundární centrum. V perinatálním období je zřejmé zesílení oblasti, která se pojí s horními čelistmi a nosními kostmi, a v orbitě zvlnění (Inman & Saunders, 1937; Cunningham et al., 2016).

Při narození se čelní kost skládá ze dvou symetrických polovin od sebe oddělených metopickým švem. V anteriosuperiorním úhlu se stýká s temenními kostmi v anteriorním lupínku, který je největší ze všech fetálních fontanel. Jeho rozměry jsou variabilní. Velikost lupínku nesouvisí s pohlavím, obvodem hlavy, kostním věkem nebo s časem

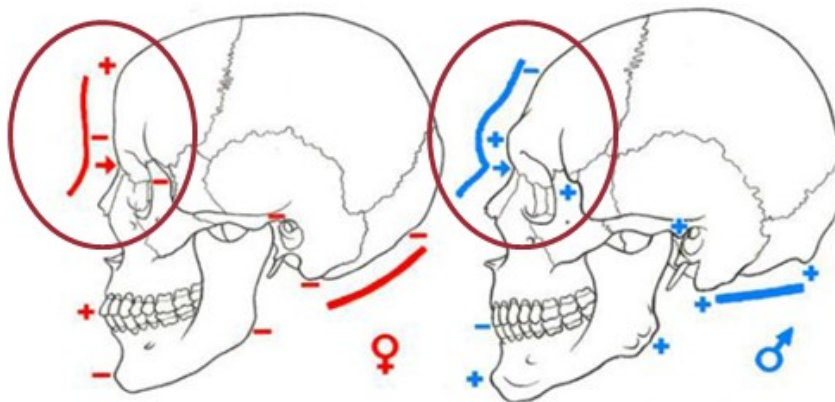
uzavření (Čihák, 2011; Cunningham et al., 2016). 38 % fontanel je uzavřeno na konci prvního roku života, dalších 58 % do dvou let (Popich & Smith, 1972). Metopický šev se postupně uzavírá během postnatálního života, až úplně vymizí. Někteří jedinci mají metopický šev zachován i v dospělosti (Čihák, 2011; Cunningham et al., 2016). Na dobu uzavření metopického švu panují odlišné názory. Cunningham et al. (2016) uvádí uzavření do prvního roku života a úplné vymizení ve dvou letech věku dítěte. Esteve-Altava et al. (2017) popisuje obliteraci metopického švu a spojení obou polovin do jedné kosti až kolem 8. roku. Postnatální růst čelní kosti je u chlapců zaznamenán od 1 měsíce do 16 let (Young, 1957) a u dívek od 5 do 15 let (Meredith, 1959).

Během prvních třech let se čelní kost stává více klenutá. Poté dochází k úpravám v souvislosti s růstem čelní dutiny a obličejového skeletu. Dutiny se zakládají během fetálního období. K expanzi dochází mezi 3. a 4. rokem a poté se pomalu rozvíjí až do puberty. K největšímu rozmachu dochází během pubertálního růstového spurtu a končí u dívek ve 13 a u chlapců v 15 letech, či podle jiných názorů až okolo 20. roku (Čihák, 2013; Cunningham et al., 2016).

2.3.4 Odhad pohlaví na základě čelní kosti

Pohlavní dimorfismus kraniofaciální oblasti, kterou je čelní kost, byl pozorován u mnoha lidských populací a hraje důležitou roli při odhadu pohlaví ve forenzních vědách a archeologii (Walker, 2008). Čelní kost má velký potenciál pro odhad pohlaví. Nese vysoký počet pohlavně dimorfních oblastí, což z ní činí jeden z nejcennějších regionů lebky pro zjišťování pohlaví z lidských ostatků (Dempf & Eckert, 2010; Walker, 2008; Shearer et al., 2012). Vedle glabely, která je nejdimorfnější a nejspolehlivější částí (Williams & Rogers, 2006; Garvin et al., 2014), jsou pro pohlavní diagnózu významné taky další pohlavně odlišné znaky. Obecný tvar čelní kosti a sklonění šupiny je větší u mužů. Nadoboční oblouky jsou výraznější také u mužů. Čelní hrboly však více prominují u žen (Buikstra & Ubelaker, 1994; Graw, 2001; Bulut et al., 2016). Úhel, který se vytváří u oblasti glabely mezi čelem a nosem, je u mužů ostrý na rozdíl od žen, u kterých má tupější tendenci (Altman, 2012). Morfologie čelní kosti se liší podle původu jedince. Obrys čela u Afroameričanů je více zaoblený než u bělochů, kteří mají více strmější zakřivení (Krogman, 1962). Projev pohlavního dimorfismu je ovlivněn také věkem. Důsledkem stárnutí dochází k poklesu rozdílů mezi mladší a starší skupinou ve formě i tvaru. Co se

týče čelní kosti, ve formě došlo ke snížení pohlavně dimorfního projevu v oblasti horní části šupiny a ve tvaru v oblasti nadobočních oblouků (Musilová et al., 2016).



Obrázek 6. Obecné zobrazení pohlavního dimorfismu na lebce, zejména na čelní kosti – vpravo ženy, vlevo muži (upraveno podle Čihák, 2011).

Tradičně byly znaky popisovány pomocí kvalitativních metod, které jsou však zatíženy kritikou pro jejich subjektivitu a statistická omezení. Morfoskopické metody využívají vizuálního posouzení čelní kosti. Ženská čelní kost je širší a prudčeji stoupající než mužská. Muži mají méně zaoblené čelo, zatímco ženy ho mají zaoblené a plné (Keen, 1950; Krogman, 1962). Pozdější studie popsala rozdíly v úhlu čela následovně. Ženské čelní kosti bývají více vertikální, zatímco muži mají šikmé ustupující čelo (Russell et al., 1985). Prominenci nadobočních oblouků lze hodnotit pomocí metod založených na skórovacím systému, na základě kterých se přiřazuje stupeň rozvoje k danému znaku. Trojúrovňový systém označuje první stupeň za nulové či stopové vyklenutí, druhý střední a třetím je klasifikována zřetelná eminence (Keen, 1950). Podobně je tomu tak u hodnocení tvaru obrysu čelní kosti, avšak tentokrát od jedné do pěti, přičemž jednička označuje téměř plochou oblast glabely, a značí tedy ženu (Buikstra & Ubelaker, 1994). Obdobnou metodologii používal také Walker (2008), který zjistil, že klasifikace pohlaví na základě samotné oblasti glabely vede k největší úspěšnosti, a to 82,6 %.

Morfologii individuálních rysů lze přesně zachytit také morfometrickými technikami, které poskytují nástroj pro objektivní popis znaků a statistickou analýzu. Morfometrické studie lebek považují za důležitou zejména prominenci nadobočních oblouků (Rosas & Bastir, 2002; Walker, 2008; Garvin & Ruff, 2012; Shearer et al., 2012). Poměrně málo

prací se zabývá celkovým tvarem čelní kosti nebo obrysem čela (Hochstein, 2014; Bulut et al., 2016). Trojrozměrná kvantifikace nadobočních oblouků, které jsou charakterizovány absolutními rozměry ploch a objemů, poměrem těchto proměnných a také tvarem kvantifikovaným pomocí skóre hlavních komponent, potvrdila významné rozdíly mezi pohlavími. To lze částečně připsat celkovým rozdílům ve velikosti rozměrů mezi muži a ženami. Studie však dokazuje větší a více vyčnívající nadoboční oblouky u mužů. Kromě této skutečnosti byly nalezeny také mediolaterální tvarové rozdíly, které odrážejí rozdíly mezi glabelou a laterálnější oblastí. V extrémních mužských formách je zřejmé, že navzdory výraznému vystoupení glabely, boční oblasti vykazují větší prominenci než střední linie. Ženská čelní kost zůstává u oblasti glabely plochá, a to bez ohledu na případné laterální vyvýšení. Na základě zmíněné 3D kvantifikace nadobočních oblouků je možná správná klasifikace pohlaví v necelých 80 % po crossvalidaci (Garvin & Ruff, 2012). Větší objem mužských nadobočních oblouků potvrdila i další studie. Ta ještě navíc pozorovala také odlišnosti mezi geograficky rozdílnými populacemi a mezi časově odlišnými populacemi ze stejné lokality, a zaznamenala rozdíly. Například portugalské a afroamerické ženy mají velmi podobné objemy struktury, ale portugalské muži jsou typičtí větší robustností než ti afroameričtí. Pozdní kalifornští indiáni vykazují vyšší poměry objemu nadobočních oblouků než časné skupiny (Shearer et al., 2012). Kromě analýz, které využívají 3D modely lebek, lze hodnocení pohlaví provádět také na laterálních rentgenových snímcích. Dokládá to geometricko-morfometrická studie, která ukazuje tvarové rozdíly mezi pohlavími a dokazuje silnou expanzi glabely u mužů a pokles u žen. Tato metodologie klasifikovala pohlaví s mírně vyšší úspěšností než výše zmíněná 3D studie, tedy 84 % (Perlaza, 2014).

Jak již bylo zmíněno, hodnocení objemu nadobočních oblouků a expanze glabely nejsou jedinou oblastí zájmu při zkoumání pohlavního dimorfismu čelní kosti. Celkový tvar a obrys kosti si zde také našel své místo. Sklon čelní kosti a nadobočních oblastí byl zachycen pomocí křivek – mediální, která dokumentuje zakřivení čelní kosti v linii spojující body *bregma* – *glabella* – *nasion*, a dvě laterální, které kopírují zakřivení čelní kosti přes největší prominenci nadobočních oblouků. Tato metodologie se ukázala jako úspěšnější při zařazování žen. Po crossvalidaci byly ženy správně klasifikovány v 88 % případů, ale muži pouze v 70 %. Tato práce však pokládá dobrý základ pro budoucí výzkum. Zpřesnění metody a rozšíření testovaného vzorku přispěje ke zlepšení klasifikace a přinese užitečnou techniku, která doplní současné přístupy v odhadu pohlaví (Hochstein,

2014). Bulut et al. (2016) představil novou, nelandmarkovou metodu založenou na kvantifikaci rozdílu ve tvaru mezi mužskou a ženskou čelní kostí. Zaoblenost mužských a ženských čelních kostí hodnotil porovnáním 3D povrchu modelů čelních kostí a odpovídající 3D koule vytvořené pomocí softwaru. Barevné mapy ukazují, že u mužů oblasti jako glabella, horní okraje očí, lící výběžky, nadoboční oblouky a spánkové plochy jsou místa, která vykazují největší rozdíl mezi čelní kostí a povrchem koule. Naopak nejvíce se překrývá horní oblast čela, včetně šupiny a čelních hrbolů. U žen se největší shoda s povrchem koule vyskytuje rovněž v regionu šupiny čelní kosti, a nejvýraznější odchylky se nachází tam, kde u mužů, navíc však ještě v oblasti čelních hrbolů. Vyklenutí spodní části čela je větší u mužů a oblast čelních hrbolů je zase výraznější u žen, což je v souladu s předchozími studiemi. Metoda byla schopna správně klasifikovat pohlaví v 77,5 % případů. Výsledky ukazují, že 3D nelandmarkové přístupy ke statistické analýze tvaru by se mohly stát alternativou k dosud převládajícím metodologiím.

2.3.5 Odhad pohlaví na základě čelních dutin

Čelní dutiny, jež jsou součástí vedlejších nosních dutin, představují struktury vyznačující se vysokou variabilitou a asymetrií, a tím také svou jedinečností u každého jedince. Díky specifickým ve tvaru, velikosti a poloze se v oblasti forenzní antropologie primárně využívají jako nástroj identifikace osob (např. Quatrehomme et al., 1996; Besana & Rogers, 2010; Uthman et al., 2010; Kim et al., 2013; Beaini et al., 2015). Tvar čelních dutin je ovlivněn pohlavím, populační specifikou, nemocemi, faktory prostředí, růstem a vývojem jedince. Vzhledem vlivu pohlaví na vzhled struktury se některé studie zaměřují též na zkoumání pohlavně dimorfních znaků a užití čelních dutin za účelem odhadu pohlaví (např. Lee et al., 2010; Goyal et al., 2013; Sai Kiran et al., 2014; Benghiac et al., 2015). Výhodou, jak pro identifikaci i odhad pohlaví, je velmi dobrá odolnost vůči traumatu a také vysoká pravděpodobnost zachování struktury při rozčlenění či spálení těla během hromadných katastrof a havárií (da Silva et al., 2009).

Při studiu čelních dutin jsou používány rentgenové snímky (Sai Kiran et al., 2014; Belaldavar et al., 2014), ale také 3D modely vytvořené z CT skenů (Michel et al., 2015; Benghiac et al., 2015), ze kterých se zjišťují parametry vypovídající o velikosti dutin jako o ukazateli pohlaví. Jsou jimi maximální výška, maximální šířka, výška a šířka pravé a levé části, povrch a objem. Někteří autoři využívají změřené rozměry pro výpočet indexu

čelních dutin, jako poměru maximální výšky a maximální šířky (Sai Kiran et al., 2014; Benghiac et al., 2015). Studie pracující s laterálními kefalometrickými rentgenovými snímky zjistila pomocí indexu rozdíly mezi muži a ženami, což dokazuje pohlavně dimorfní odlišnosti čelních dutin. Diskriminační rovnice byla schopna rozlišit pohlaví zkoumaného souboru s 67,5% přesností (Sai Kiran et al., 2014). Podobným způsobem je index čelních dutin využíván také na 3D modelech vytvořených na základě skenů zachycených Cone Beam CT, které umožňuje prostorové zobrazení a zpracování do trojrozměrného obrazu (Miracle et al., 2009; Benghiac et al., 2015). Přesnost metody je nízká a dosáhla v testovacím souboru 63 % a ve validačním datovém souboru jen 77 %. Kromě korelace pohlaví s indexem čelních dutin, byla také studována souvztažnost indexu s věkem. Přidání věku, jako další proměnné, významně neovlivnilo schopnost odhadu (Benghiac et al., 2015).

Vliv věku na odhad pohlaví byl také zohledněn v dalších studiích (Belaldavar et al., 2014; Michel et al., 2015; Akhlaghi et al., 2016). Práce, používající antero-posteriorní RTG zobrazení lebek, se zaměřila na jedince ve věku 25 – 30 let. Výběr kategorie mladých dospělých byl zvolen záměrně, jelikož teprve okolo 20. roku ukončují čelní dutiny svůj vývoj a od této doby se stávají stabilně vypadající strukturou. Ve stáří pak opět podléhají změnám, stěny se tenčí a dutiny se zdají být větší. Výsledky analýzy několika měřených parametrů ukázaly, že maximální výšky a šířky i povrchy dutin jsou větší u mužů než u žen. Studie také odhalila, že pravá čelní dutina je rozměrnější než levá, a to u obou pohlaví. Popisovaná metoda umožnila odhadnout pohlaví s mírou přesnosti 64,4 % (Belaldavar et al., 2014). Akhlaghi et al. (2016) pro účely sledování čelních dutin v souvislosti s odhadem pohlaví a věkem rozřadili jedince do třech věkových skupin. Ve věkové skupině 20 – 34 let byl rozdíl mezi pohlavími ve výšce i šířce dutin signifikantní. Největší přesnost zaznamenala výška levé dutiny (60,8 %). V kategorii 35 – 49 let byl nejúspěšnější v klasifikaci pohlaví předozadní průměr pravé dutiny (52,3 %). Ve věku 50 a více let nedosáhl žádný parametr statisticky významné úrovně. Zato na základě objemu čelních dutin nebyly odhaleny žádné signifikantní rozdíly ve věkovém rozložení mezi ženskými a mužskými skupinami, ani žádné zásadní odlišnost mezi pravou a levou dutinou. Diskriminace pohlaví pomocí objemu dosáhla přesnosti 72,5 %. Vzhledem k tomu, že práce je zaměřena též na věk a nejen izolovaně na pohlaví, nebyla prokázána přítomnost vzájemného vztahu mezi věkem a objemem čelních dutin (Michel et al., 2015).

3 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY

Ve své diplomové práci se zaměřuji na zkoumání čelních kostí a čelních dutin za účelem využití těchto struktur pro klasifikaci pohlaví ve forenzních vědách a bioarcheologii. **Cíle** jsem stanovila následovně:

1. Zhodnotit pohlavní dimorfismus povrchu čelní kosti za využití metod geometrické morfometrie.
2. Využít metodu Buluta et al. (2016) pro klasifikaci pohlaví.
3. Zhodnotit pohlavní dimorfismus čelních dutin za využití metod geometrické morfometrie.
4. Zjistit, zda současné využití vnějšího povrchu čelní kosti a čelních dutin zvýší přesnost klasifikace.

Zpracováním zvoleného tématu práce a analýzou dostupného materiálu pomocí vybraných metod dospěji k závěru, kterým potvrdím či vyvrátím vytyčené **hypotézy**:

1. Povrch čelní kosti bude mít nižší diskriminační sílu než povrch celé lebky.
2. Současné využití vnějšího povrchu čelní kosti a čelních dutin zvýší přesnost klasifikace.

4 MATERIÁL

Hodnocení pohlavního dimorfismu vnějšího povrchu čelních kostí a čelních dutin bylo provedeno v současné české populaci. Použila jsem CT snímky jedinců, kteří podstoupili vyšetření počítačovou tomografií na radiodiagnostickém oddělení v nemocnici Na Homolce v Praze. U všech těchto jedinců bylo provedeno vyšetření mozku či lebky z medicínského důvodu, nejednalo se však o patologie, které by způsobily změnu morfologie lebky. Pacienti ve věku 21 až 83 let poskytli svá anonymizovaná data na základě informovaného souhlasu. Tabulka 1 uvádí počty jedinců a údaje o věku.

Tabulka 1. Složení současné české populace.

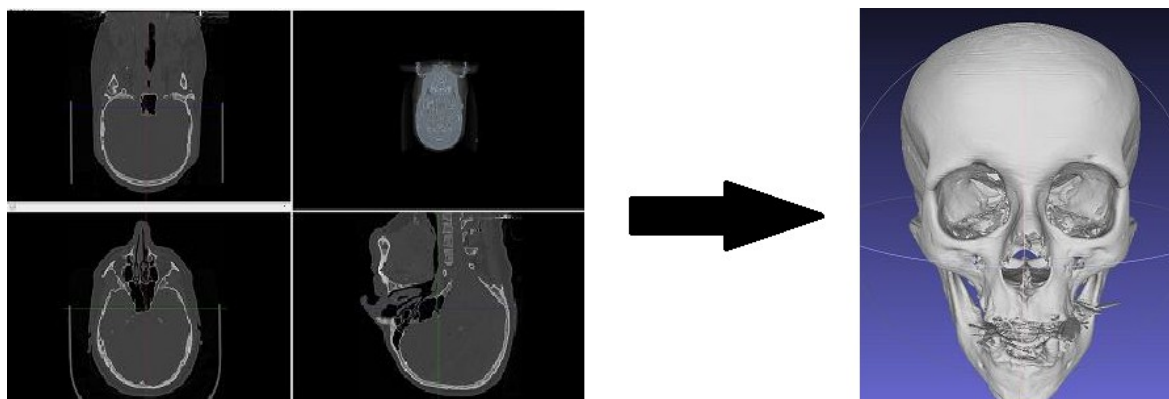
	Počet jedinců	Rozmezí věku
Muži	58	32 – 91
Ženy	45	28 – 84
Celkem	103	28 – 91

5 METODY

Nejprve bylo nutné z materiálu ve formě CT snímků hlav jedinců vysegmentovat lebku v softwaru Morphome3cs. Z té bylo následně prováděno ořezávání potřebných povrchových struktur (*os frontale* a následně jen samotný *sinus frontalis*) a jejich úprava v softwarech MeshLab a RapidForm. Získaná data byla podrobena statistické analýze.

5.1 Úprava materiálu

V softwaru Morphome3cs (CGG MF UK, 2015), vyvinutém Matematicko-fyzikální fakultou Karlovy Univerzity ve spolupráci s Katedrou antropologie a genetiky člověka, byly pomocí prohlížeče objemových dat načteny CT snímky. Na každém zobrazení byla nastavena prahová hodnota potřebná pro odstranění měkkých tkání, což umožnilo vysegmentování kosti. Takto získaná lebka byla exportována do programu MeshLab (Visual Computing Lab, Italian National Research Council) pro následné zpracování.



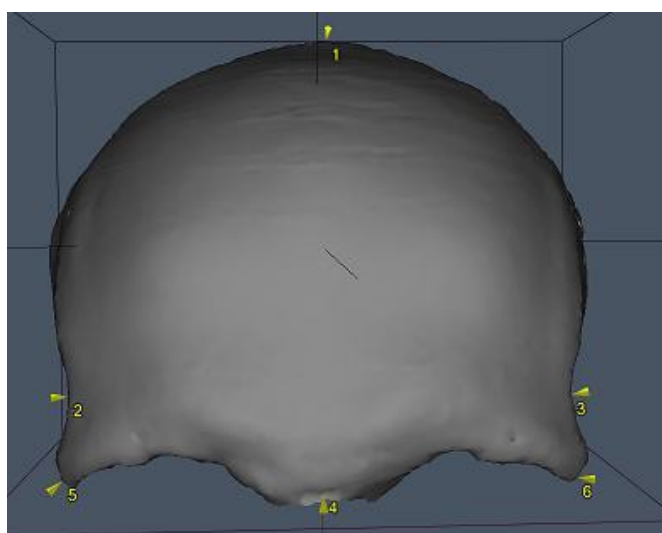
Obrázek 7. Segmentace lebky z CT snímku.

V softwaru MeshLab byla lebka zmenšena, a poté byly odstraněny podložky a pomocné destičky v okolí hlavy pacientů, ale také nepotřebné části skeletu, na kterých analýza neprobíhala. Čelní kost byla ořezána podél švů: *sutura frontonasalis*, *sutura frontomaxilaris*, *sutura frontozygomatica*, *sutura sphenofrontalis* a *sutura coronalis*. První ořezání bylo provedeno těsně za švy tak, aby byly zachovány, což umožnilo umístění význačných bodů. Landmarky byly lokalizovány v softwaru Morphome3cs. Použito bylo celkem 6 bodů, z toho nepárové – *bregma* a *nasion*, a párové – *frontomeporale dx et sin* a *frontomalare anterior dx et sin*.

Tabulka 2. Seznam landmarků a jejich popis (dle autorů Broca, Törek, Howells, Topinard).

Landmarky	Popis landmarků
<i>Bregma</i>	Bod v místě křížení švů <i>sutura coronalis</i> a <i>sutura sagittalis</i>
<i>Nasion</i>	Bod na průsečíku mediální roviny se švem <i>sutura frontonasalis</i>
<i>Frontotemporale dx et sin</i>	Bod na <i>linea temporalis</i> nejbližší k mediální rovině (vpravo i vlevo)
<i>Frontomalare anterior dx et sin</i>	Bod nejvíce vpředu na švu <i>sutura frontozygomatica</i> (vpravo i vlevo)

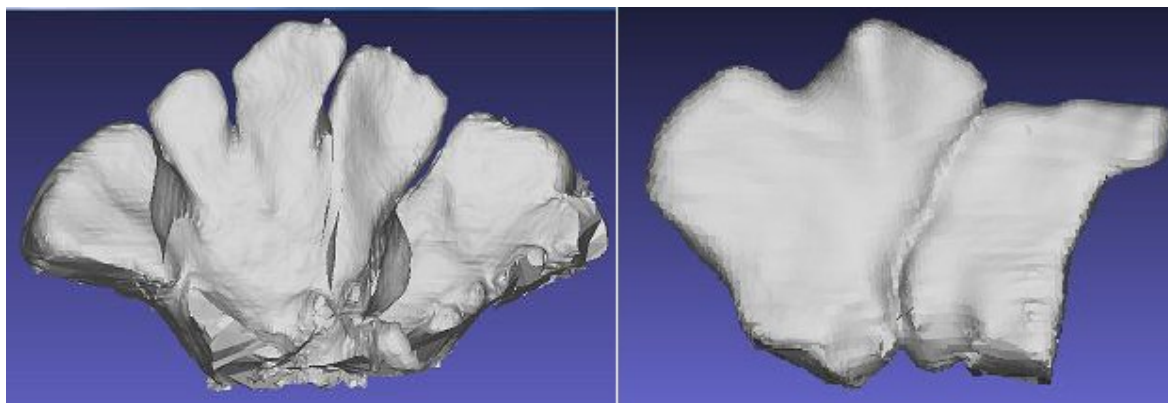
Poté byl původní model opět v programu MeshLab ořezán. Tentokrát však tak, aby zůstal pouze vnější povrch již samotné čelní kosti bez přiléhajících částí, které byly prvně ponechány kvůli landmarkování. Posléze byly landmarky z původního modelu přeneseny na nový, který byl již konečným modelem využitým při analýze vnějšího povrchu čelní kosti, při analýze povrchu čelní kosti ověřující metodu Buluta et al. (2016) a pro zjištění poloměru křivosti čelních kostí.



1. BREGMA
2. FRONTOTEMPORALE DX
3. FRONTOTEMPORALE SIN
4. NASION
5. FRONTOMALARE ANTERIOR DX
6. FRONTOMALARE ANTERIOR SIN

Obrázek 8. Zadávané landmarky na vnější povrch čelní kosti.

Úprava modelů čelních dutin probíhala v softwarech Meshlab a RapidForm XOS 2006 (INUS Technology Inc.). V prvním ze zmíněných programů došlo k odstranění vnitřního i vnějšího povrchu čelní kosti a ořezání jejích zbytků. Další zpracování probíhalo v RapidFormu, ve kterém byl uzavřen vstup do dutin a další otvory vzniklé při skenování a segmentaci.



Obrázek 9. Ukázka čelních dutin dvou různých jedinců.

5.2 Analýza vnějšího povrchu čelní kosti

Analýza probíhala v programu Morphome3sc, který využívá metod geometrické morfometrie. Geometrický popis tvaru vycházel z landmarků, tedy souřadnic biologicky významných bodů. Moderní přístupy nabízí možnost popisu tvaru pomocí trojúhelníkové sítě či analytické reprezentace křivek a ploch. Metody geometrické morfometrie umožňují analýzu formy i tvaru 3D modelů, a její vizualizaci (Bookstein, 1997; Slice, 2007; Mitteroecker & Gunz, 2009).

5.2.1 Coherent point drift/dense correspondence analýza (CPD/DCA)

Před samotnou analýzou je nutné všechny modely sjednotit, aby měly stejný počet trojúhelníků a bodů. Nejprve byla provedena rigidní registrace pomocí 6 nanesených landmarků, která slouží k zarovnání takovým způsobem, aby vzdálenost mezi korespondujícími landmarky byla minimální. Poté došlo k nerigidní registraci dat pomocí CPD/DCA (Dupej et al., 2014). Nerigidní registrace spočívá v elastické transformaci, při které dochází k přeškálování a ohýbání modelů s cílem jejich zarovnání. Tato metoda detekuje všechny homologní landmarky pomocí geometrických znaků, a poté deformuje odpovídající povrchy a trojúhelníky jednotlivých modelů na sebe. Tím dojde k zarovnání

shodných tvarů, které se liší v umístění, velikosti a geometrických detailech. CPD/DCA je upravená původní dense correspondence analýza, která závisí na prostorových deformacích podle zadaných landmarků. Na rozdíl od té, CPD/DCA automaticky detekuje souhlasné landmarky pomocí geometrických znaků, což umožňuje přesnější a efektivnější sjednocení modelů (Myronenko & Song, 2010; Dupej et al., 2014).

5.2.2 Analýza hlavních komponent (PCA)

Variabilita čelních kostí, její rozložení v rámci souboru českých mužů a žen a vliv jednotlivých jejích komponent na formu a tvar byla hodnocena pomocí analýzy hlavních komponent. Jedná se o multivariační analýzu, která slouží k získání nejdůležitějších informací o souboru, ke sledování variability a ke zjednodušení vzájemně souvztažných znaků. Hlavní komponenty jsou lineární kombinací původních proměnných. Představují umělé veličiny, které popisují celkovou variabilitu pozorovaných znaků. První hlavní komponenta vysvětluje největší procento variability. Každá další pak zachycuje menší část variability, která nebyla popsána předchozími komponentami (Mitteroecker & Gunz, 2009; Abdi & Williams, 2010; Zendlich et al., 2012).

O počtu hlavních komponent, které se budou posuzovat, rozhodne tzv. „broken stick“, v „scree plot“ grafu zobrazená jako dělicí čára. Komponenty, které leží nad touto hranicí, ovlivňují variabilitu nejvíce, naopak pod ní se nachází ty s malým příspěvkem (Jackson, 1993). Variabilita v prvních dvou hlavních komponentách je zobrazena v korelačním grafu („scatter plot“).

5.2.3 Hodnocení signifikance

Statisticky významné rozdíly ve vnějším povrchu čelních kostí mezi pohlavími byly vizualizovány pomocí funkce „Shell distance signifikance“. Ta využívá princip dvouvýběrového t-testu spočítaného na vzdálenostech jednotlivých povrchů od povrchu průměrného pro dané dvě skupiny jedinců. Vypočítává rozdíl umístění mezi odpovídajícími vrcholy polygonových sítí. Výsledkem je barevná mapa, ve které jednotlivé barvy představují odlišné p-hodnoty. Nejtmavší odstín modré barvy označuje místa, která odpovídají hodnotám menším než 0,001. Střední odstín znamená hodnotu 0,001 až 0,01. Nejsvětější modrá pak charakterizuje oblasti s p-hodnotou mezi 0,01 a 0,05. Bílá barva odpovídá hodnotám nad 0,05 a znamená nepřítomnost statisticky významných rozdílů.

Signifikantnost nejdůležitějších hlavních komponent byla ověřena použitím Hotellingova t-testu, který vychází ze skóre hlavních komponent a porovnává střední

hodnoty dané proměnné u dvou skupin. P-hodnota menší než 0,05 ukazuje statisticky významný rozdíl mezi muži a ženami (Morrison, 2005).

5.3 Analýza čelních dutin

Vysegmentované a upravené čelní dutiny byly hodnoceny s využitím dvou veličin, jimiž jsou objem a povrch. Obě tyto hodnoty byly zjišťovány pomocí softwaru MeshLab, který umožňuje výpočet rozměrů vloženého modelu.

Ve statistickém programu PAST (Paleontological Statistics, version 2.17) byl proveden test normality, Shapiro-Wilk, pro každou analyzovanou veličinu. Ten ukázal, zdali rozložení v populaci je normální či nikoliv (Shapiro & Wilk, 1965). Poté bylo otestováno, jestli v naměřených veličinách mezi muži a ženami existuje signifikantní rozdíl. Pro znak, jehož rozložení je normální, byl použitý dvouvýběrový T-test. Pro znak, jehož rozložení není normální, byl aplikován Mann-Whitneyho U test.

Po provedení úvodních statistických hodnocení byla provedena predikce pohlaví pomocí klasifikátoru Support vector machine (SVM) s crossvalidací, jehož princip je uveden v následující podkapitole.

5.4 Klasifikace pohlaví

5.4.1 Klasifikace pohlaví pomocí Support vector machine

Klasifikace pohlaví jedinců našeho souboru byla provedena pomocí klasifikátoru Support vector machine (SVM) s crossvalidací. Tato metoda byla použita pro predikci pohlaví na základě vnějšího povrchu čelních kostí, objemu a povrchu čelních dutin a také na obě struktury zároveň pro ověření úspěšnosti jejich současného využití.

Support vector machine je metoda učícího algoritmu. Základem SVM je použití nadrovin pro definování kritérií, na základě kterých dochází k oddělení dat do různých tříd. Analýza je schopna zvládnout jednoduché lineární klasifikační úkoly, ale také složitější nelineární případy. Cílem SVM je zmapování původních datových bodů ze vstupního prostoru do prostoru funkcí tak, aby se klasifikace stala jednodušší. Mapování nelineárně rozložených vlastností prostoru se provádí pomocí vhodného výběru funkce jádra (Cortes & Vapnik, 1995; Luts et al., 2010). Pomocí Support vector machine lze vyřešit problémy, které by v klasických technikách vyžadovaly velké množství parametrů (Vapnik et al., 1997).

Klasifikátor SVM byl použit zároveň s crossvalidací. Crossvalidace (CV) slouží pro zjištění, jak bude model statistické analýzy ovlivňovat nezávislé vzorky dat. Tato metoda je významná pro predikci neznámých souborů po předchozí klasifikaci známých. Klasifikátor natrénuje model na známé množině dat a pomocí crossvalidace se poté testuje, jaká bude úspěšnost klasifikace na datech nových. Hojně využívaná je metoda leave-one-out crossvalidace. Během ní je jedinec vyjmut z modelování, a poté je, na základě vytvořeného modelu, klasifikován. Tento proces se opakuje s každým jedincem v souboru. Predikované hodnoty a hodnoty reálné se mezi sebou porovnají. Výsledkem je zjištění, jak úspěšný klasifikátor byl. Díky crossvalidaci jsou eliminovány chybné výstupy. Pomáhá zpřesnit prezentované výsledky (Kohavi, 1995; Cawley, 2006).

5.4.2 Využití metody Buluta et al. (2016) a poloměru křivosti pro klasifikaci pohlaví

Pohlaví našeho souboru mužů a žen bylo klasifikováno pomocí nelandmarkové metody navržené Bulutem et al. (2016), čímž byla otestována její úspěšnost na české populaci. Metoda porovnává povrch čelní kosti vůči povrchu koule modelované softwarem. Na základě relativní velikosti plochy čelní kosti, která je ke kouli blíže než 1 mm, bylo odhadováno pohlaví. Tento postup byl aplikován též v naší studii. Nejprve byla zjištěna plocha čelní kosti vzdálená od povrchu koule méně než 1 mm. Následně byla ověřena statistická významnost rozdílu v dané veličině mezi pohlavími pomocí neparametrického dvouvýběrového nepárového testu Wilcoxon. P-hodnota menší než 0,05 značí signifikantnost analyzované proměnné.

Klasifikace pohlaví na základě velikosti ploch čelních kosti vzhledem ke kouli menší než 1 mm byla provedena pomocí logistické regrese. Jedná se o metodu, která predikuje pravděpodobnost toho, zdali se nějaká událost stane či nikoliv. Odhaduje pravděpodobnost jevu – závislé proměnné, na základě známých skutečností – nezávislých proměnných. Závislá proměnná nabývá 0 nebo 1 a určuje, s jakou pravděpodobností se jedná o danou kategorii, v našem případě o muže nebo ženu. Hranicí pro rozlišení obou skupin je hodnota 0,5 (Agresti, 2002).

Zmíněný Wilcoxon test byl použitý také pro ověření signifikance rozdílů v poloměru křivosti mezi muži a ženami, a metoda logistické regrese byla využita pro klasifikaci pohlaví na základě této veličiny.

6 VÝSLEDKY

Výsledky práce jsou členěny do třech hlavních kapitol. První část popisuje variabilitu povrchu čelních kostí jedinců zkoumaného souboru pomocí analýzy hlavních komponent. Dále je věnována hodnocení pohlavního dimorfismu na vnějším povrchu čelních kostí, který je zachycen pomocí barevných map. Všechny analýzy byly provedeny pro tvar i formu.

Druhá část popisuje statistické hodnocení čelních dutin souboru českých jedinců v souvislosti s pohlavním dimorfismem. Sledovanými veličinami byl objem a povrch čelních dutin.

V další kapitole jsou uvedeny výsledky klasifikace pohlaví na základě formy a tvaru vnějšího povrchu čelní kosti, pomocí metody Buluta et al. (2016), poloměru křivosti povrchu čelní kosti, objemu a povrchu čelních dutin. Na závěr jsou prezentovány také výsledky klasifikace pohlaví s pomocí současného využití vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin z důvodu ověření úspěšnosti odhadu pohlaví za použití obou těchto struktur.

6.1 Analýza vnějšího povrchu čelní kosti

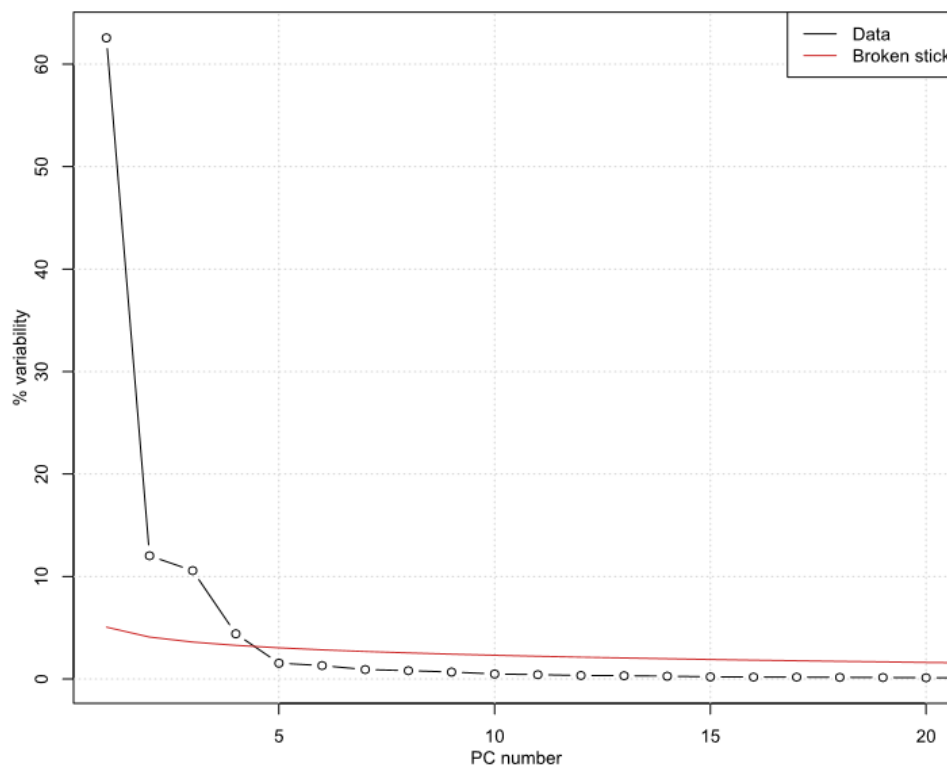
6.1.1 Hodnocení variability čelních kostí pomocí PCA

6.1.1.1 PCA pro formu čelní kosti

Suťový graf (obrázek 10) s využitím nástroje „broken stick“ ukázal, že první čtyři komponenty tvořily významný podíl variability souboru. Tyto první čtyři komponenty dohromady tvořily 89,61 % variability.

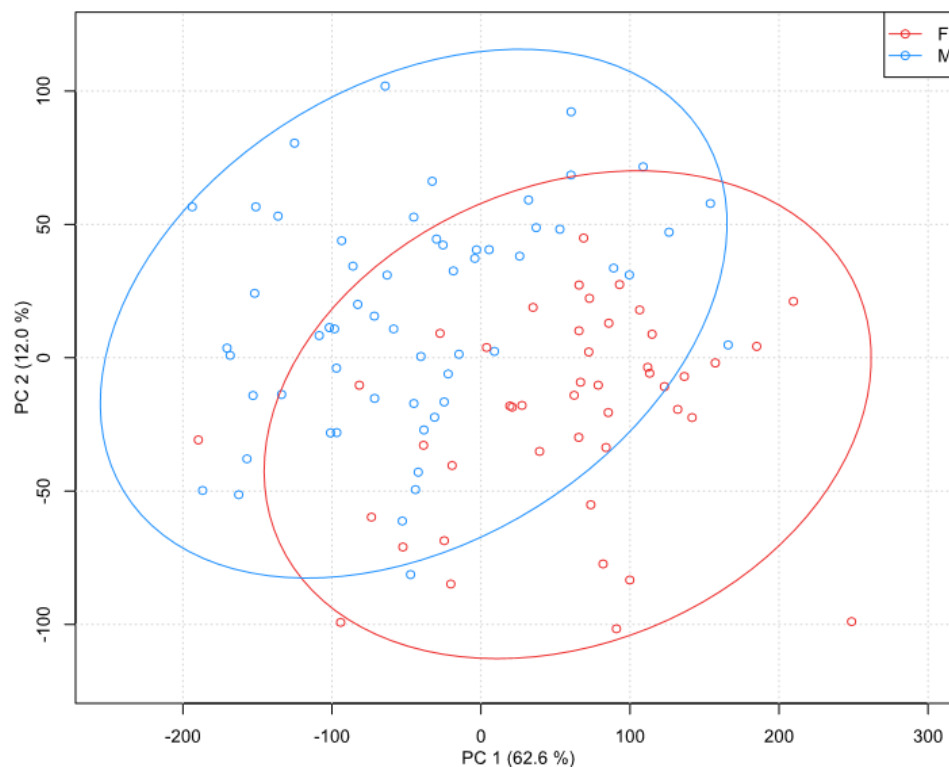
Tabulka 3. Variabilita formy v prvních deseti hlavních komponentách.

PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variabilita (%)	62,58	12,03	10,58	4,42	1,55	1,31	0,93	0,82	0,68	0,49



Obrázek 10. Suťový graf pro formu vnějšího povrchu čelní kosti s použitím nástroje „broken stick“.

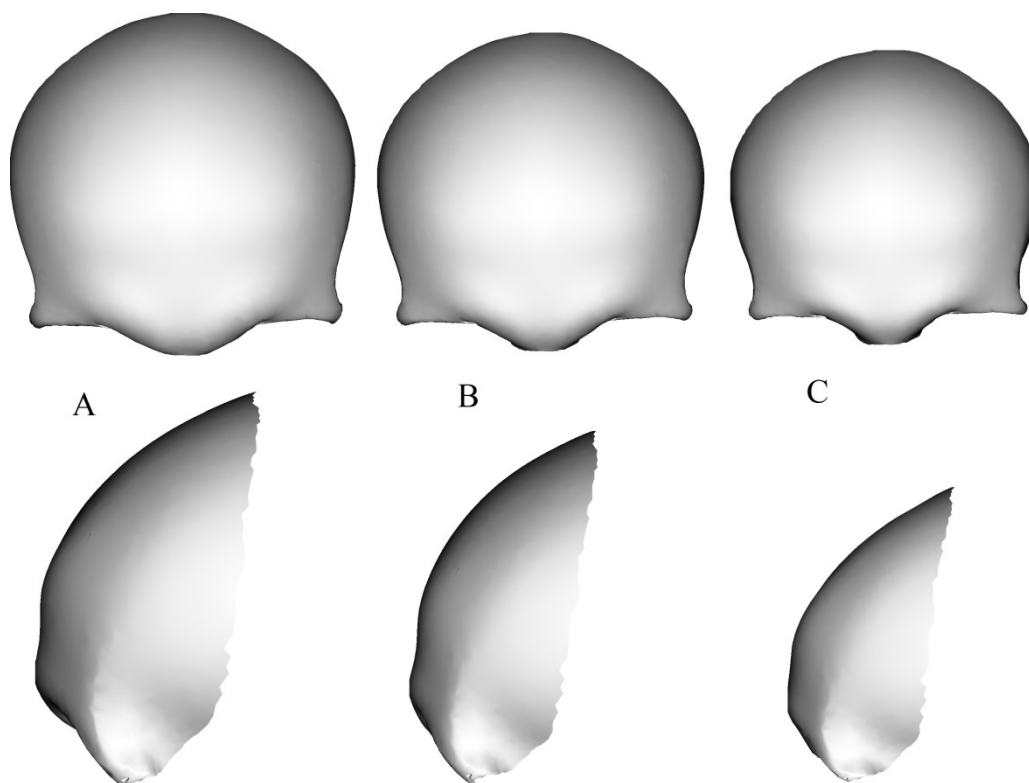
Vliv prvních dvou hlavních komponent lze zobrazit pomocí „scatterplotu“ (obrázek 11). V případě PC1 a PC2 není rozložení jedinců podle obou pohlaví formy čelní kosti výrazně odlišné. Variabilita se značně překrývá. Mužské čelní kosti vykazují mírně větší posun do záporných hodnot první komponenty a kladných hodnot v druhé hlavní komponentě. Naopak ženy zaujímají pozitivnější lokalizaci na ose znázorňující první komponentu a nepatrně zápornější umístění na ose druhé komponenty.



Obrázek 11. Rozložení variability v PC1 a PC2 pro formu vnějšího povrchu čelní kosti (F – ženy, M – muži).

PC1, první hlavní komponenta, jednoznačně tvoří většinu z celkové variability, a to 62,57 %. Vysvětluje především variabilitu související s velikostí čelní kosti. Směrem do záporných hodnot se velikost čelní kosti zvyšuje. Naopak posun první hlavní komponenty do kladných hodnot způsobuje snížení celkové velikosti. Obrázek 12 znázorňuje vliv PC1 na formu vnějšího povrchu čelní kosti. Vlevo je zobrazena nejvíce záporná hodnota první komponenty, vpravo nejvíce kladný projev. Prostřední část obrázku ukazuje průměrného jedince v daném souboru.

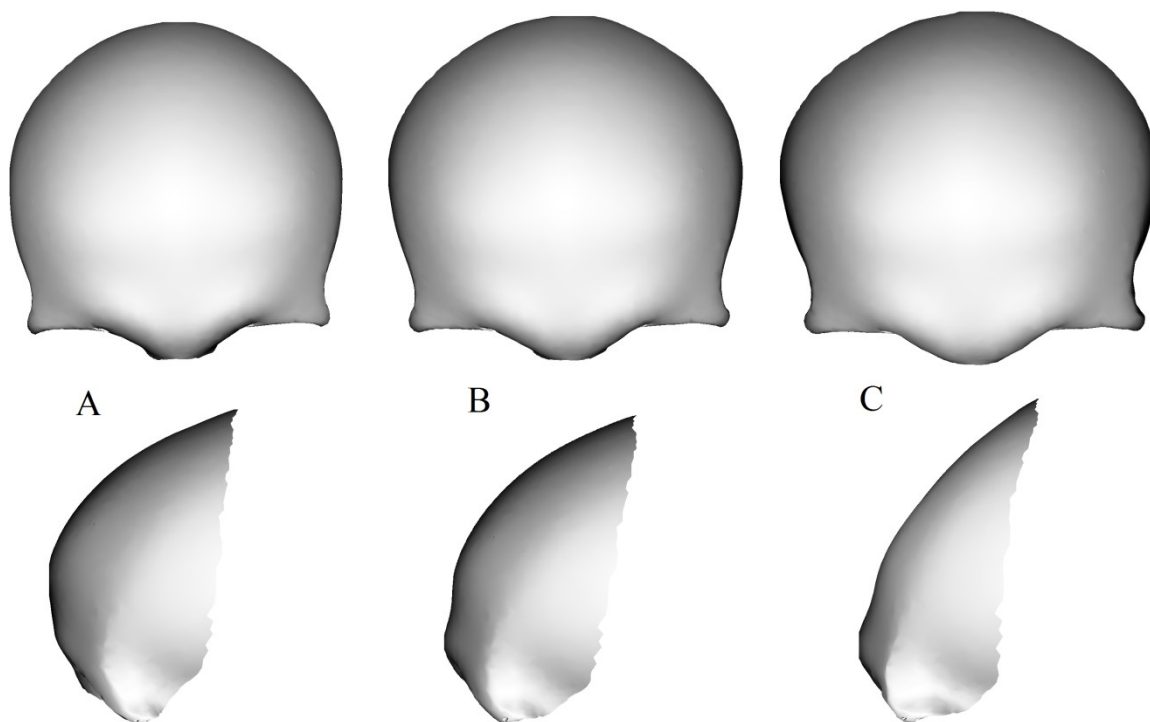
Z laterálního pohledu (obrázek 12) lze také pozorovat mírné snižování strmosti horní poloviny šupiny čelní kosti směrem do pozitivních hodnot, což na základě rozložení variability vizualizované ve „scatterplotu“ vypovídá o větší strmosti čelní kosti u mužů. V pozitivních hodnotách ustupuje více pozvolna.



Obrázek 12. Změny formy čelní kosti vyjádřené PC1: Čelní kosti odpovídající (A) nejvíce negativní hodnotě, (B) nulové hodnotě, (C) nejvíce pozitivní hodnotě.

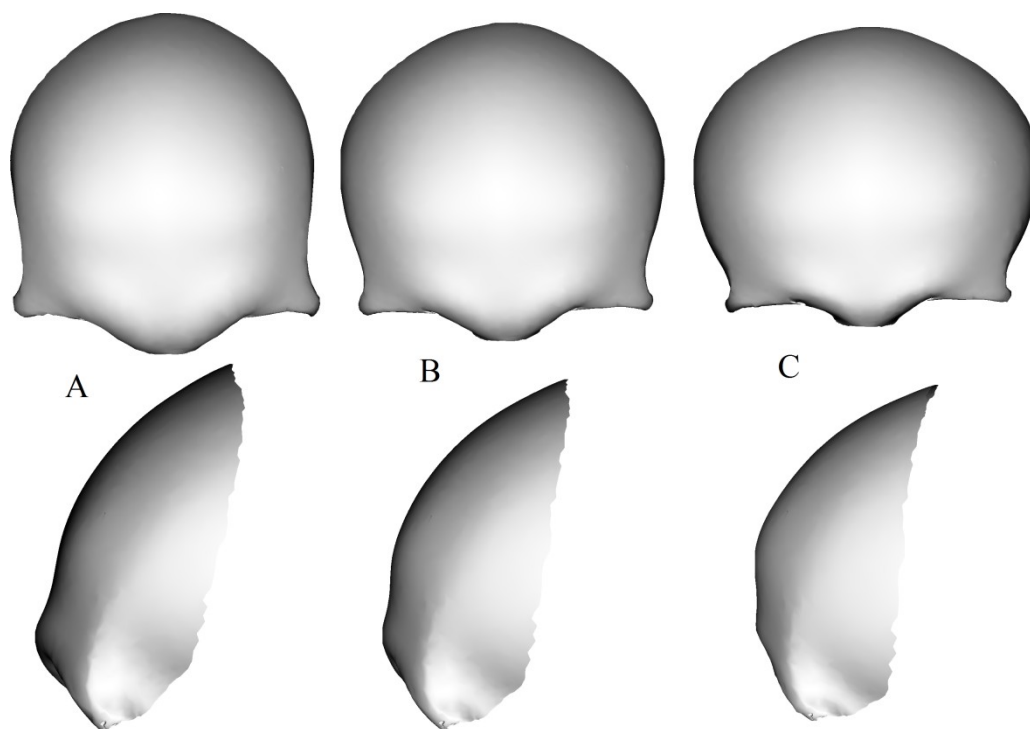
Druhá hlavní komponenta, PC2, se na celkové variabilitě podílí z 12,02 %. Tato komponenta charakterizuje zejména vyklenutí čelní kosti. Posun do záporných hodnot značí výraznou prominenci v oblasti čelních hrbolů. To stírá rozdíly mezi vyklenutím této oblasti a nadobočních oblouků, které naopak nejsou tak výrazné. Směrem do pozitivních hodnot dochází ke zmenšení vyboulení ve střední části šupiny a zvýraznění nadobočních oblouků. Zmíněné změny jsou patrné na bočním pohledu (obrázek 13).

Frontální pohled (obrázek 13) ukazuje proměnu v druhé komponentě v šířce čelní kosti. V případě záporných hodnot v PC2 dochází k jejímu zúžení. S přibývajícím kladnou hodnotou se čelní kost postupně rozšiřuje a laterální spánkové části se zdají být více mohutné.



Obrázek 13. Změny formy čelní kosti vyjádřené PC2: Čelní kost odpovídající (A) nejvíce negativní hodnotě, (B) nulové hodnotě, (C) nejvíce pozitivní hodnotě.

Třetí hlavní komponenta, PC3, se na celkové variabilitě podílí z 10,57 %. Hodnoty, které se pohybují záporným směrem a jsou typické spíše pro muže, zvyšují vyklenutí nadobočních oblouků. Posunem opačným směrem po ose třetí komponenty se zvýrazňuje prominence oblasti čelních hrbolů. Přispívá také k rozšíření a zkrácení čelní kosti v kladných hodnotách a naopak v záporných k jejímu zúžení a prodloužení.



Obrázek 14. Změny formy čelní kosti vyjádřené PC3: Čelní kost odpovídající (A) nejvíce negativní hodnotě, (B) nulové hodnotě, (C) nejvíce pozitivní hodnotě.

Čtvrtá hlavní komponenta, PC4, z celkové variability tvoří pouze 4,41 %. Tato komponenta doplňuje předchozí komponenty ve vyklenutí i a šířce čelní kosti. Variabilita mezi pohlavími se na základě třetí i čtvrté komponenty velmi překrývá, proto jejich grafické zobrazení nebylo v diplomové práci zařazeno.

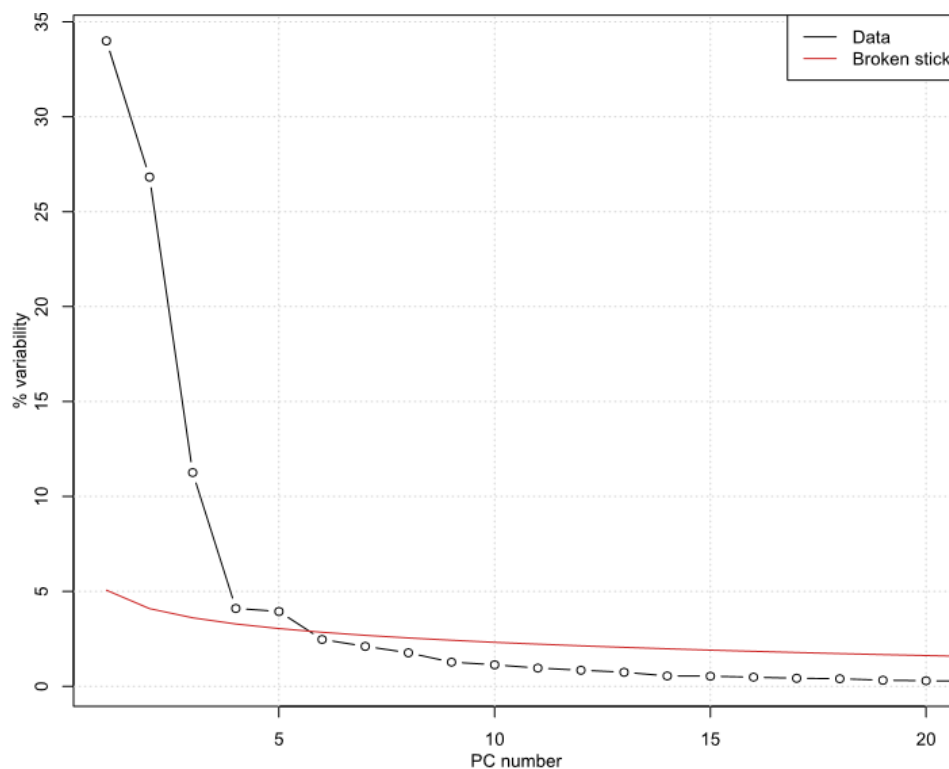
První čtyři komponenty byly podrobeny statistickému hodnocení za účelem zjištění, zda se forma vnějšího povrchu čelní kosti mezi muži a ženami liší. S využitím PCA skóre byl aplikován Hotellingův t-test, který dokázal, že mezi pohlavími je signifikantní rozdíl ve formě vnějšího povrchu čelní kosti, jelikož $p < 0,0001$.

6.1.1.2 PCA pro tvar čelní kosti

Po odstranění vlivu velikosti lze studovat tvarové změny, které jsou přítomny mezi vnějším povrchem čelní kosti mužů a žen. Na suťovém grafu (obrázek 15) je zobrazen vliv hlavních komponent, přičemž prvních 5 PC má na celkové variabilitě nejvýznamnější podíl, a to 80,17 %.

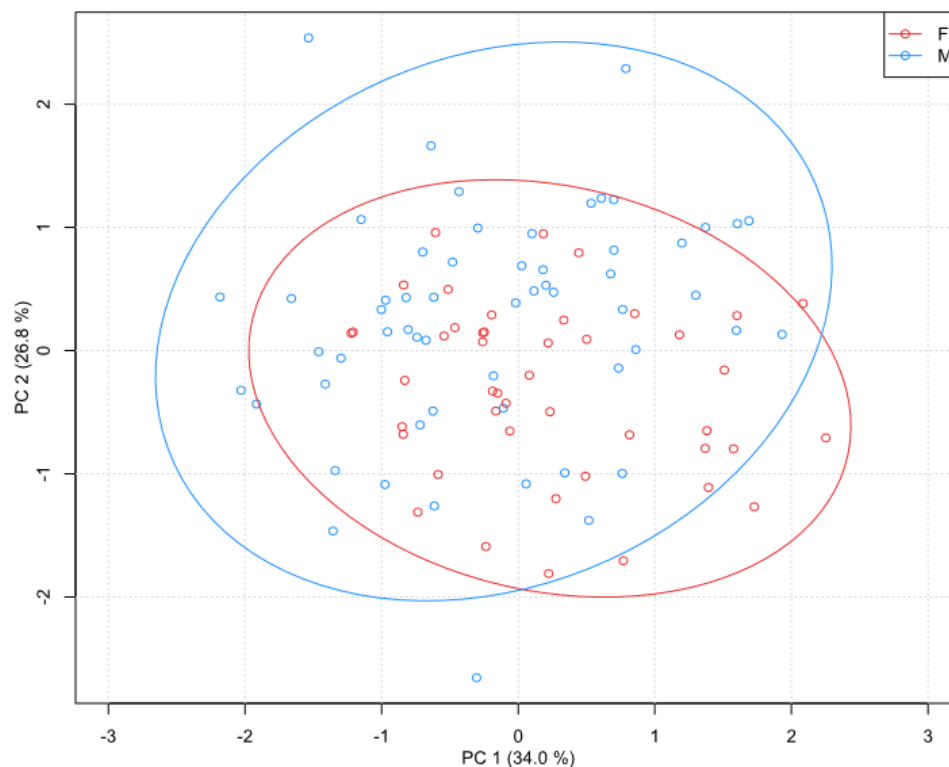
Tabulka 4. Variabilita tvaru v prvních deseti hlavních komponentách.

PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variabilita (%)	34,00	26,86	11,26	4,11	3,94	2,47	2,11	1,77	1,27	1,14



Obrázek 15. Suťový graf pro tvar vnějšího povrchu čelní kosti s použitím nástroje „broken stick“.

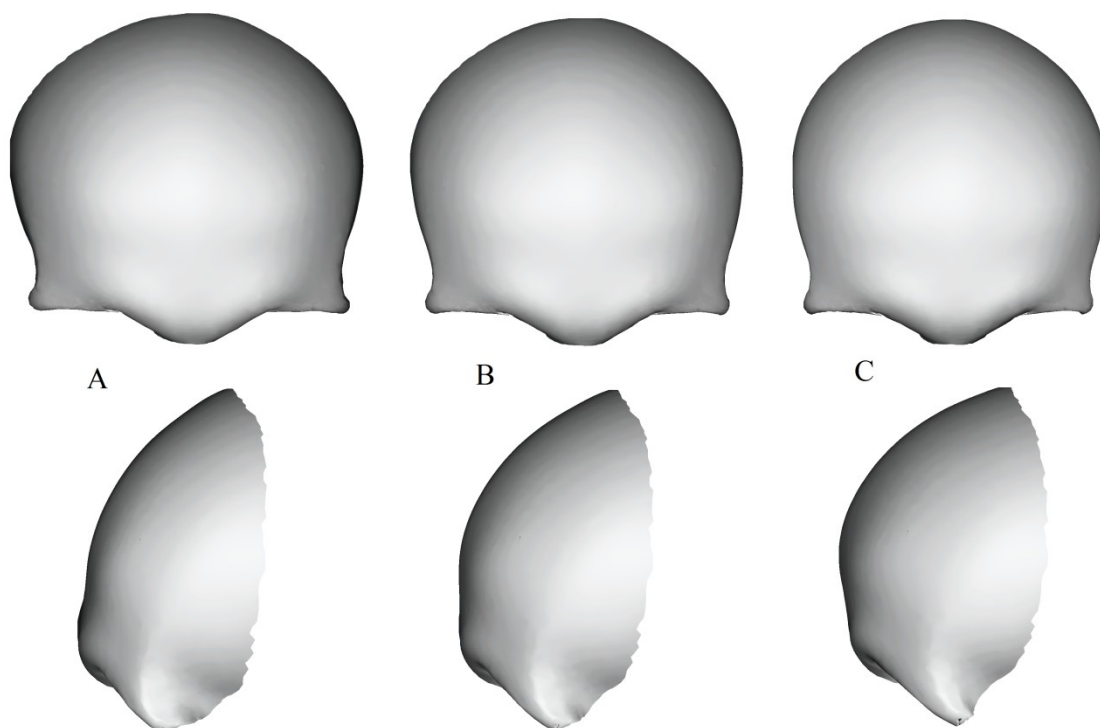
V případě PC1 a PC2 lze vidět, na „scatterplotu“ přiloženém níže (obrázek 16), že variabilita u žen je menší než u mužů a daleko více se překrývá. Muži se oproti ženám nachází nepatrně v zápornějších hodnotách, pokud jde o první komponentu. V druhé komponentě vykazují muži vyšší variabilitu než ženy. Záporných hodnot dosahují muži i ženy podobně, ale více kladných hodnot nabývají muži.



Obrázek 16. Rozložení variability v PC1 a PC2 pro tvar vnějšího povrchu čelní kosti (F – ženy, M – muži).

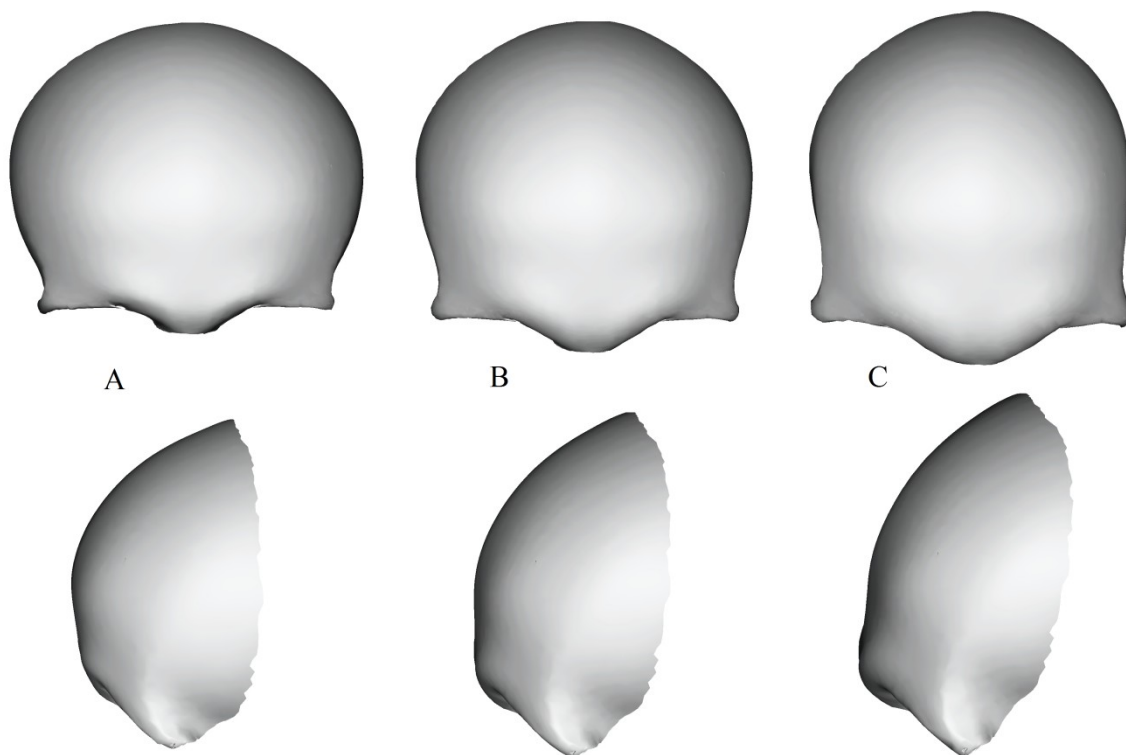
První hlavní komponenta, PC1, tvoří většinu z celkové variability – 34 %. Její vliv lze pozorovat na frontálním pohledu, ve kterém je patrné rozšíření horní části kosti v záporných hodnotách, na obrázku 17 vlevo, a zúžení v kladných, v pravé části obrázku. Průměrný tvar odpovídající nulové hodnotě je zobrazen uprostřed.

První komponenta též ovlivňuje zakřivení a vyklenutí čelní kosti, zobrazené na bočním pohledu (obrázek 17). Změna negativním směrem se projeví ve zvýraznění nadobočních oblouků a větší strmosti horní poloviny čelní šupiny. Čím více pozitivní posun, tím větší vyklenutí oblasti čelních hrbolů a snížení prominence nadobočních oblouků.



Obrázek 17. Změny tvaru čelní kosti vyjádřené PC1: Čelní kost odpovídající (A) nejvíce negativní hodnotě, (B) nulové hodnotě, (C) nejvíce pozitivní hodnotě.

Druhá hlavní komponenta, PC2, se na celkové variabilitě podílí z 26,82%. Tato komponenta také ovlivňuje vyklenutí čelní kosti. Z laterálního pohledu (obrázek 18) je vidět silné zaoblení střední části šupiny v nejvíce negativní hodnotě, ale zároveň rovněž relativní zkrácení výšky čelní kosti. Snížení čela a zároveň jeho rozšíření v horní polovině kosti dokládá i tvar pozorovaný z frontálního pohledu (obrázek 18). Naopak kladná hodnota druhé komponenty se projevuje transversálním zúžením a mediálním prodloužením čelní kosti, a její výraznější strmostí.



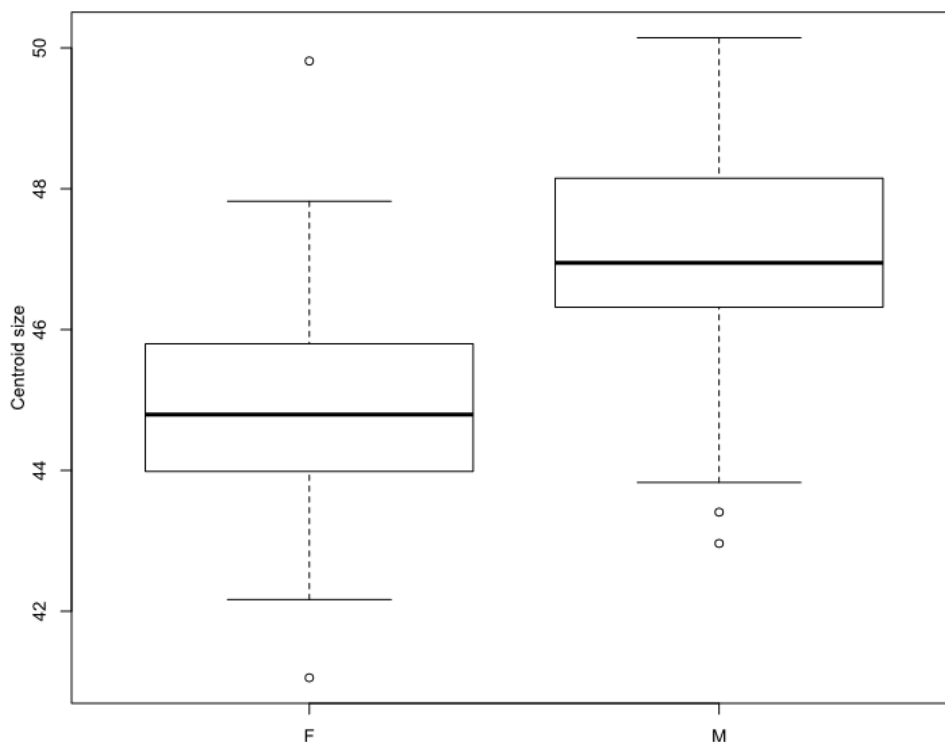
Obrázek 18. Změny tvaru čelní kosti vyjádřené PC2: Čelní kost odpovídající (A) nejvíce negativní hodnotě, (B) nulové hodnotě, (C) nejvíce pozitivní hodnotě.

Třetí hlavní komponenta, PC3, se na celkové variabilitě podílí z 11,26 %. Další komponenty přispívají k tvaru čelní kosti již nižším dílem. Čtvrtá, PC4, z celkové variability tvoří 4,1 %, a pátá, PC5, 3,94 %. Tyto komponenty ovlivňují zejména dolní polovinu čelní kosti. Mění šířku kosti v jejím nejužším místě – mezi body *frontotemporale* vpravo a vlevo, ale také vyklenutí nadobočních oblouků. Vzhledem k jejich slabšímu projevu v celkové variabilitě nebylo jejich grafické znázornění do práce zahrnuto.

Prvních pět hlavních komponent, které nástroj „broken stick“ označil jako nejvýznamnější, bylo statisticky testováno s cílem ověřit, zda se tvar vnějšího povrchu čelní kosti mezi muži a ženami liší. S využitím PCA skóre byl použit Hotellingův t-test. Ukázal, že $p < 0,0001$, a tedy mezi muži a ženami je signifikantní rozdíl ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti.

6.1.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu vnějšího povrchu čelní kosti

Mezipohlavní rozdíly čelních kostí souboru české recentní populace spočívají především ve velikosti. Graf pro zobrazení „centroid size“ (obrázek 19) ukazuje větší velikost čelních kostí u mužů než u žen.



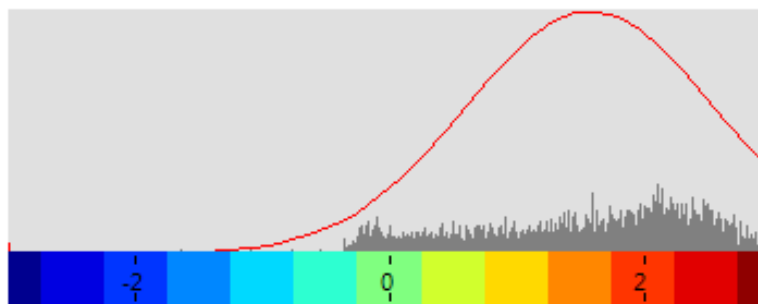
Obrázek 19. Znázornění velikosti („centroid size“) čelních kostí (F - ženy, M - muži) ($p < 0,0001$).

Pohlavní dimorfismus mužů a žen našeho vzorku byl porovnáván prostřednictvím softwaru Morphome3cs, pomocí analýzy „Compare groups“ pro formu i tvar vnějšího povrchu čelní kosti. Zmíněná analýza umožňuje srovnávání mužské a ženské čelní kosti vůči sobě a vizualizaci nalezených rozdílů pomocí barevných map.

6.1.2.1 Hodnocení pohlavního dimorfismu formy

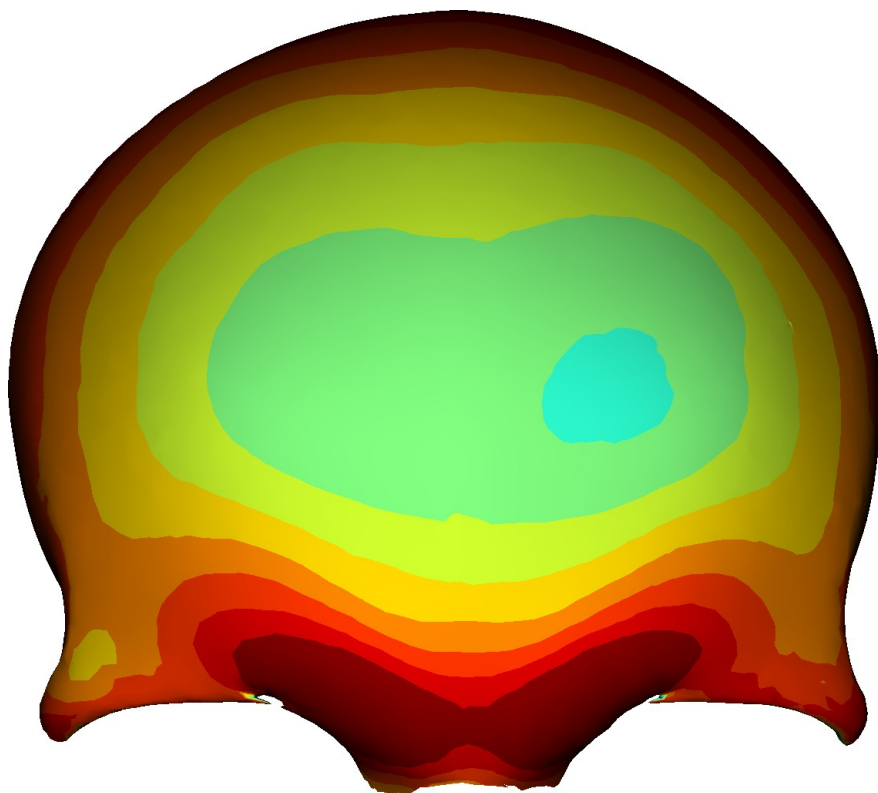
Rozdíly ve formě vnějšího povrchu čelní kosti jsou vizualizovány pomocí barevných map. Červená barva značí oblasti, které u mužské čelní kosti vystupují před ženskou. Čím tmavší odstín červené, tím větší prominence daného místa u mužů. Naopak modrá barva označuje ty části vnějšího povrchu čelní kosti, které jsou více vyklenuté u žen než u mužů.

Přesnou distribuci barevných odstínů v mapách ve vztahu k rozdílům mezi pohlavími popisuje následující škála (obrázek 20).

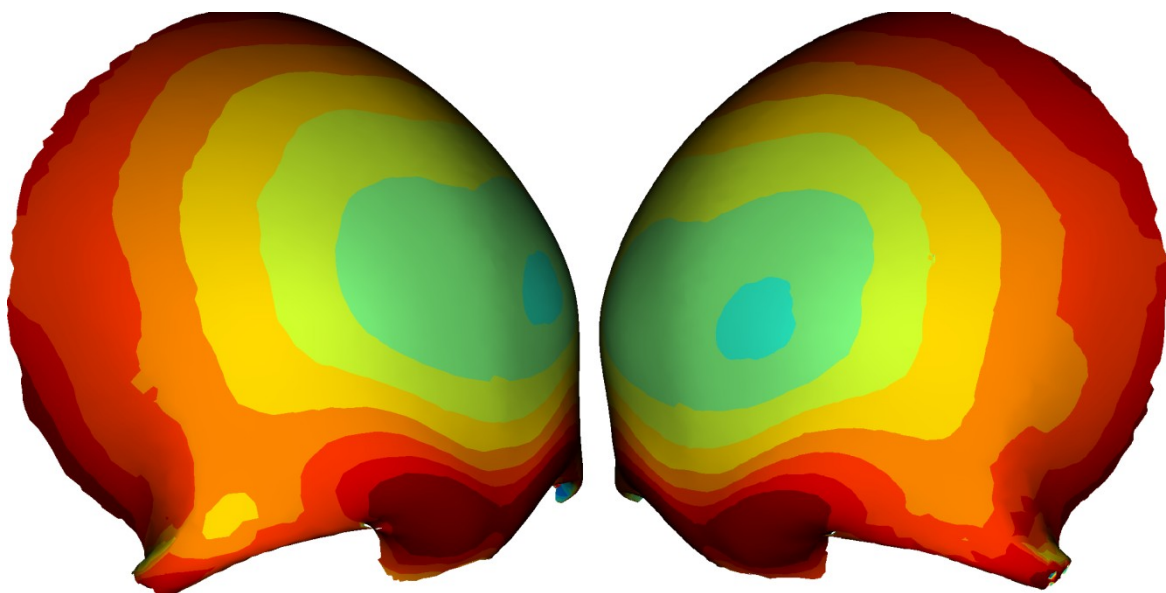


Obrázek 20. Barevná škála charakterizující rozložení rozdílů ve formě na barevných mapách (záporné hodnoty – ženy, kladné hodnoty – muži).

Z barevných map (obrázek 21, 22) vyplývá, že dolní oblast čelní kosti, glabella a nadoboční oblouky, se vyznačuje větší prominencí u mužů. Směrem nahoru do šupiny vyklenutí mužské čelní kost vůči ženské mírně ustupuje. Uprostřed *squama frontalis*, v oblasti čelních hrbolů, se naopak do popředí dostává více ženská čelní kost. Části umístěné kraniálně od tohoto středního úseku pak zase nabývají spíše pozitivních hodnot, v mapě vyznačených odstíny přes žlutou, oranžovou až po různě tmavou červenou, což popisuje postupně se zvyšující eminenci čelní kosti u mužů s vrcholem podél věncového švu, při kterém je zřetelné výrazné vyklenutí oproti ženám.

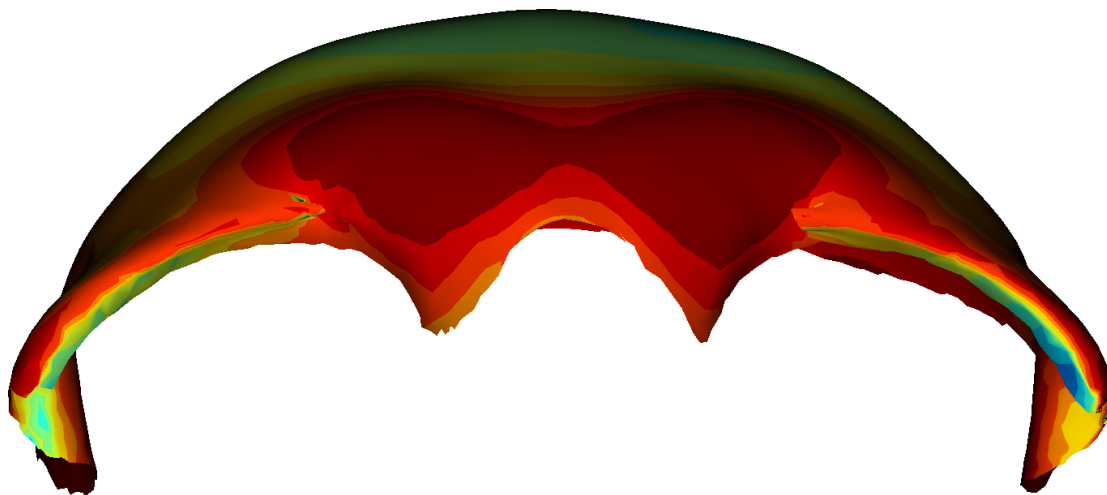


Obrázek 21. Vizualizace rozdílů ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled).



Obrázek 22. Vizualizace rozdílů ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (laterální pohled).

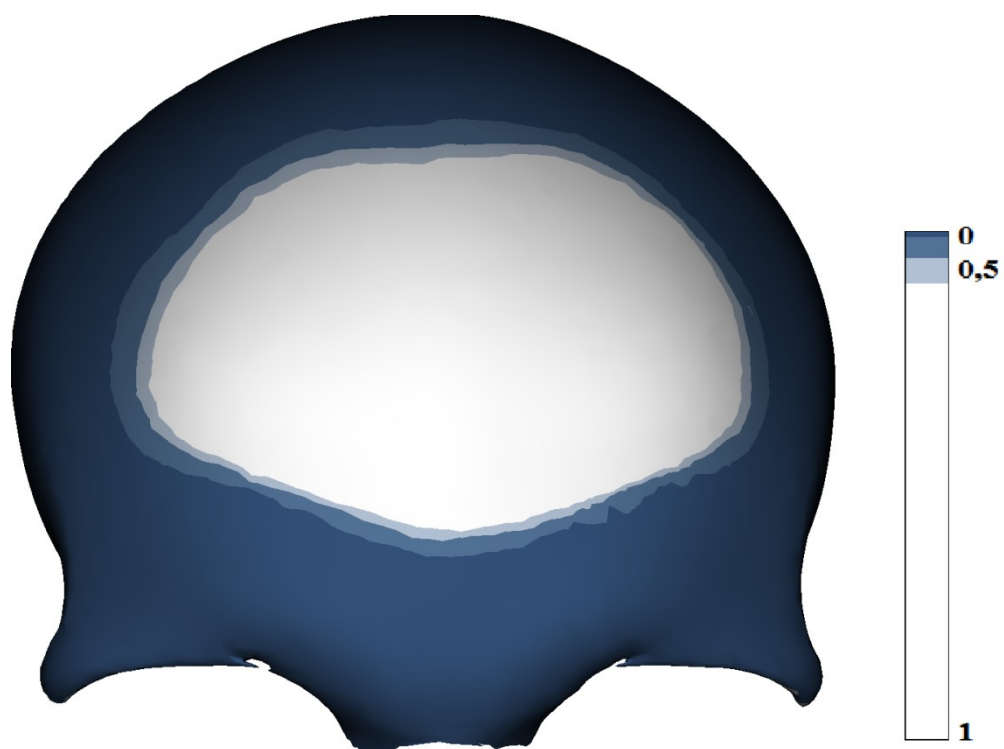
Pohlavní dimorfismus se projevuje též v očníkové části a jejím horním okraji (obrázek 23). Směrem od nadobočních oblouků k *partes orbitales*, při horním okraji očních, nejprve prominuje mužská kost, ale po přechodu do očnice je naopak více vyklenutá u žen.



Obrázek 23. Vizualizace rozdílů ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola).

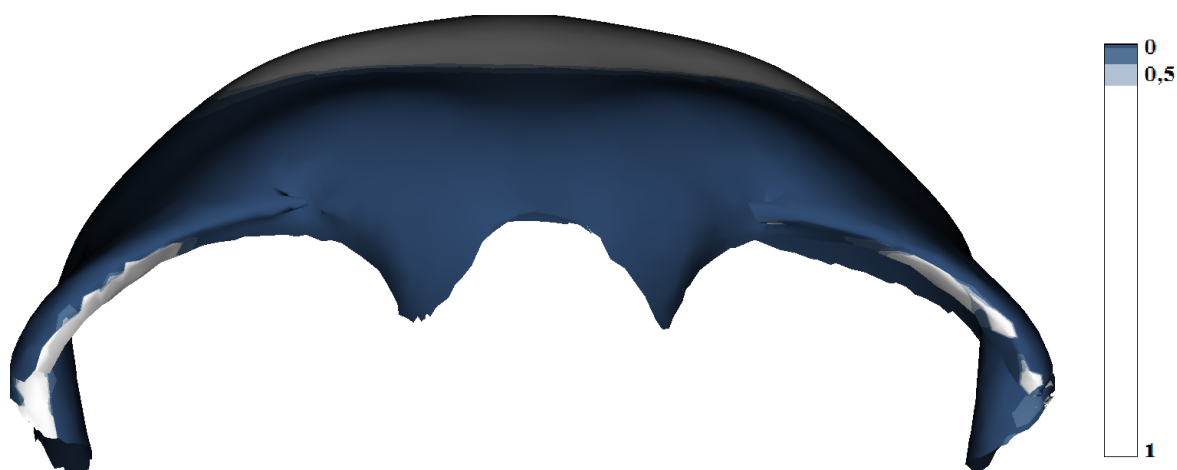
Statistická významnost rozdílů, zjištěných na formě vnějšího povrchu čelní kosti mezi muži a ženami, byla ověřena pomocí nástroje „Shell distance significance“. Výsledky testování byly vizualizovány v barevných mapách. Jednotlivé barvy značí příslušné p-hodnoty. Nejtmavší odstín modré barvy označuje oblasti s nejvyšší signifikancí, odpovídající hodnotám menším než 0,001. Střední odstín znamená hodnotu 0,001 až 0,01. Nejsvětlejší modrá pak charakterizuje oblasti nízké statistické významnosti s p-hodnotou mezi 0,01 a 0,05. Bílá barva pak odpovídá hodnotám nad 0,05 a znamená nepřítomnost statisticky významných rozdílů.

Ve formě vnějšího povrchu čelní kosti se statisticky významné rozdíly nenacházejí ve střední části čelní šupiny (obrázek 24). Zato zbylé oblasti *squama frontalis* a *pars nasalis* jsou velmi signifikantní.



Obrázek 24. Vizualizace signifikantních oblastí ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled) (škála odpovídá p-hodnotám).

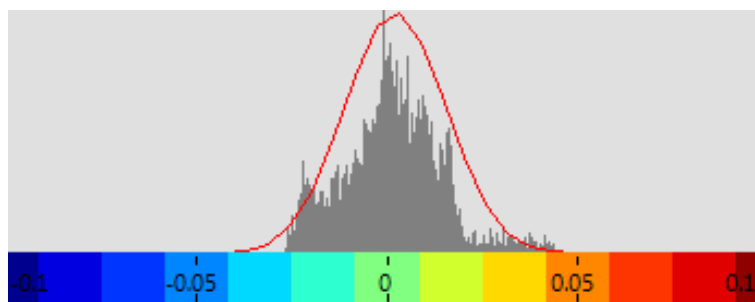
Mediální oblasti očníkové části čelní kosti vykazují statisticky významné rozdíly mezi pohlavími, ale laterální konce nikoliv (obrázek 25).



Obrázek 25. Vizualizace signifikantních oblastí ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola) (škála odpovídá p-hodnotám).

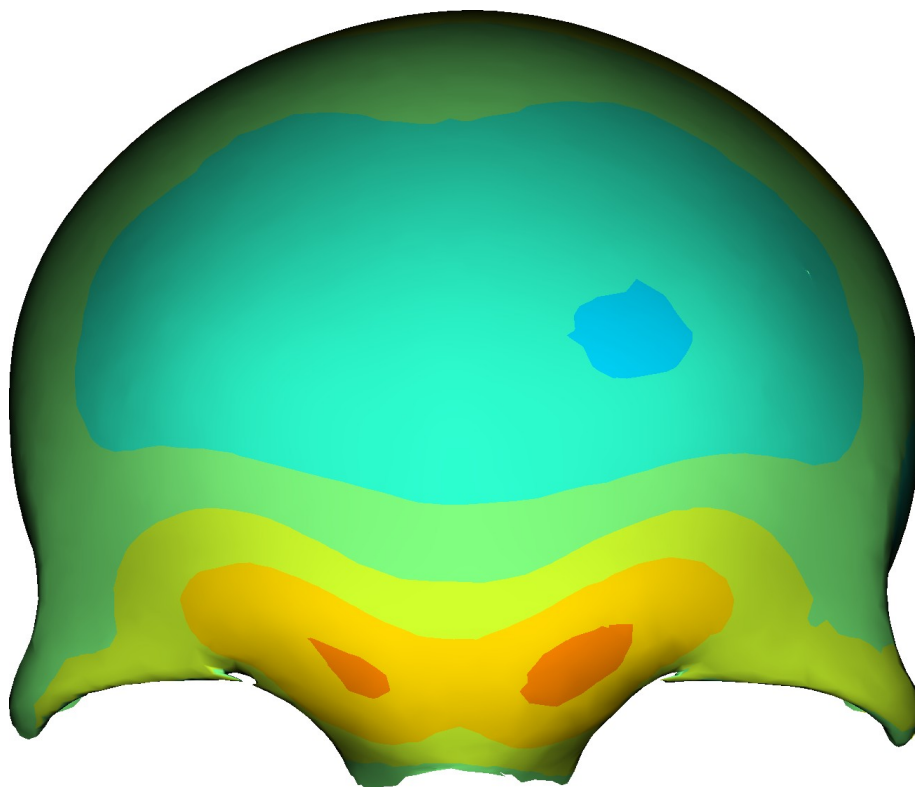
6.1.2.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu tvaru

Rovněž pro samotný tvar, po odšalování velikosti, byl vizualizován pohlavní dimorfismus pomocí barevných map. Tmavě červená barva značí extrémní mužské tvarové varianty, a tmavě modré naopak ženské. Tyto okrajové formy se ve studovaném souboru nevyskytují, barevné mapy prezentují jejich mírnější projevy. Následující škála (obrázek 26) popisuje rozložení barevných odstínů v mapách v souvislosti s příslušným pohlavím.



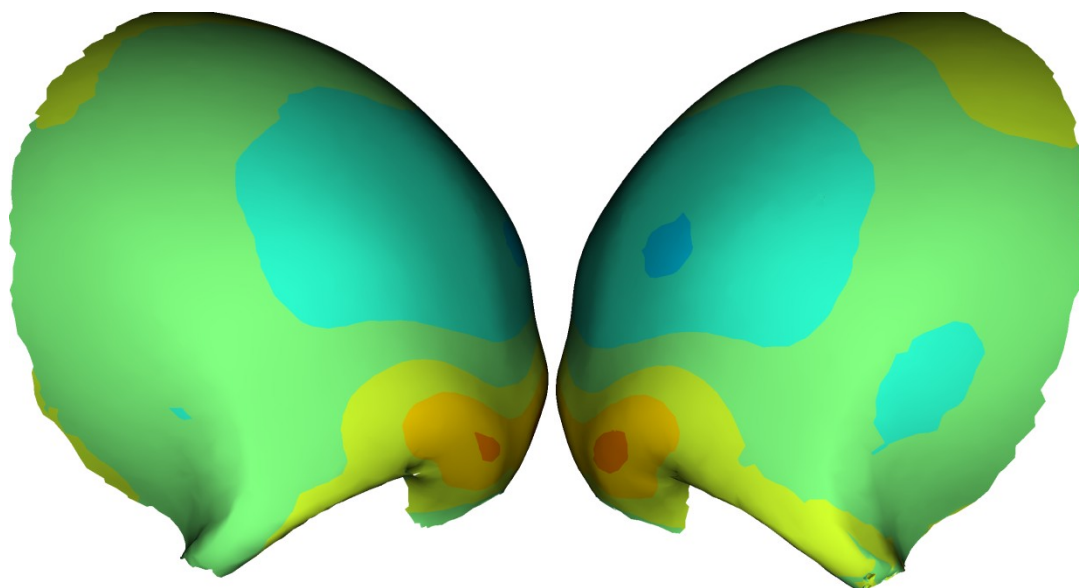
Obrázek 26. Barevná škála charakterizující rozložení rozdílů v tvaru čelních kostí na barevných mapách (záporné hodnoty – ženy, kladné hodnoty – muži).

Z barevných map (obrázek 27, 28) vyplývá, že také ve tvaru se dolní oblast čelní kosti, glabella a nadoboční oblouky, vyznačuje větší prominencí u mužů. Směrem vzhůru do šupiny se nachází úzká přechodná oblast, která nese neutrální hodnoty, avšak nad ní, ve střední části okolo čelních hrbolů, se rozpíná poměrně velká část *squama frontalis*, která je výrazněji vyklenutá u žen. Vyjma glabely, nadobočních oblouků a zmíněného regionu přiléhajícího k *tubera frontalia* nenese šupina čelní kosti z frontálního pohledu (obrázek 27) výraznější tvarové rozdíly mezi pohlavími.



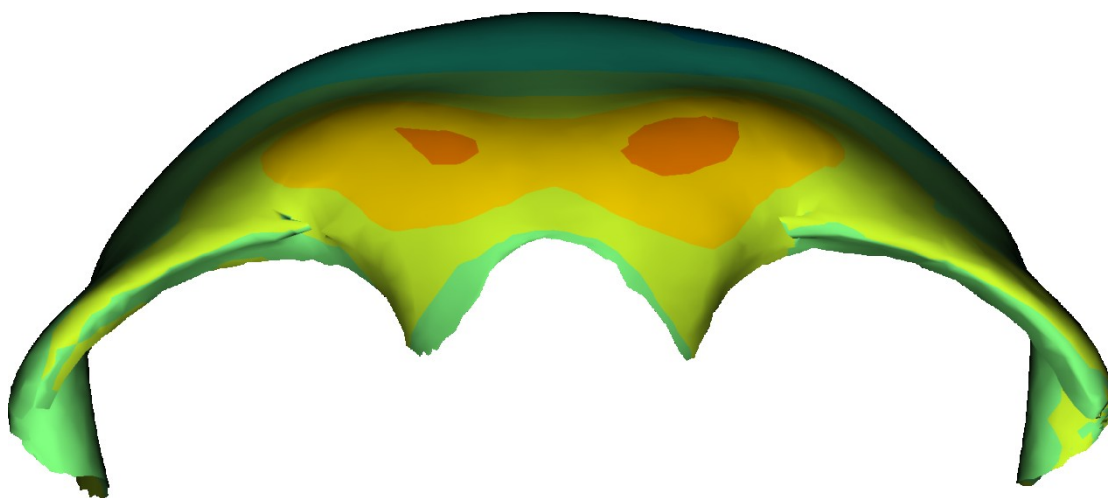
Obrázek 27. Vizualizace rozdílů ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled).

Laterální strany (obrázek 28), posteriorně *za linea temporalis*, však naznačují mírné vyklenutí u žen oproti mužům, a naopak zvýšení strmosti koncové části čelní šupiny při věncovém švu v oblasti bregmy u mužů.



Obrázek 28. Vizualizace rozdílů ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (laterální pohled).

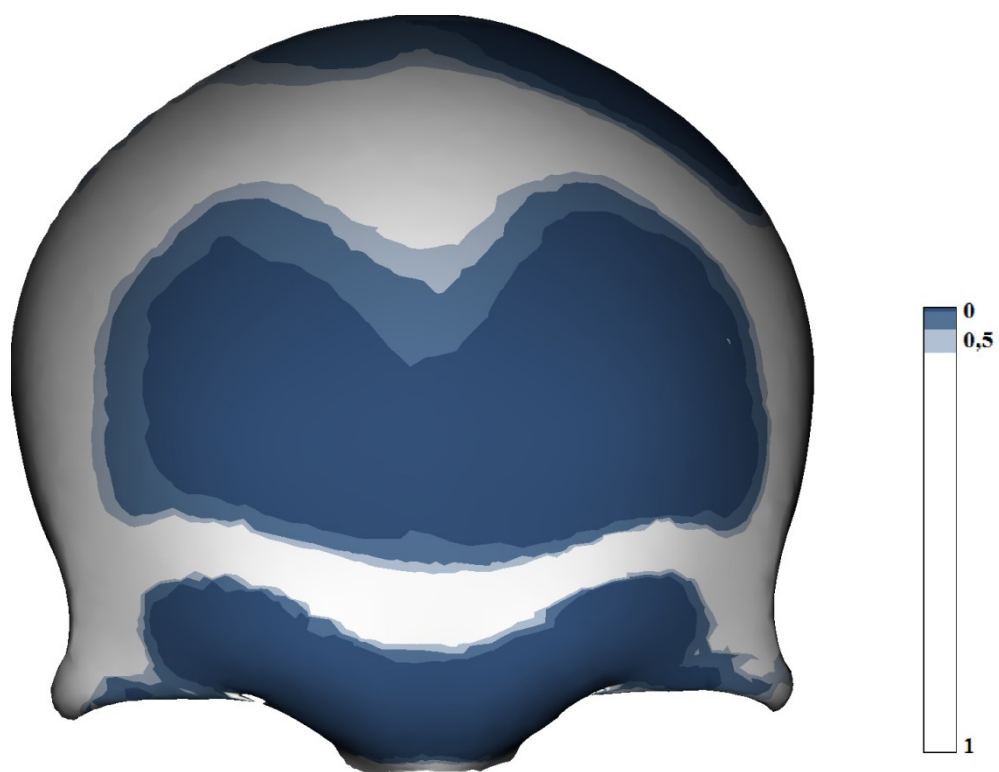
Pohlavní dimorfismus tvaru čelní kosti se projevuje též horním okrajem očních (obrázek 29), a to ve prospěch mužů. Směrem do očníce však tvar nevykazuje rozdíly.



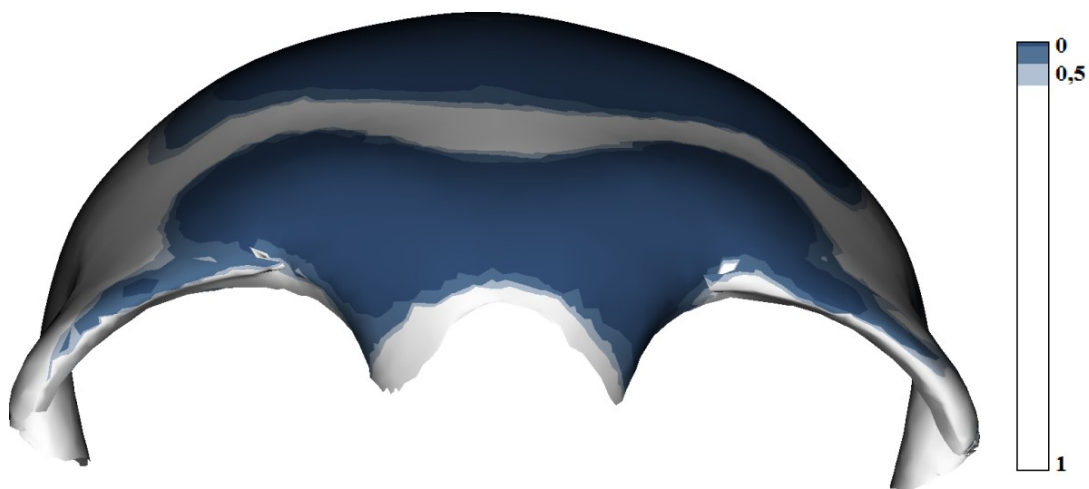
Obrázek 29. Vizualizace rozdílů ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola).

Statistická významnost rozdílů zjištěných ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti mezi muži a ženami byla rovněž ověřena pomocí nástroje „Shell distance significance“. Výsledky byly prezentovány v barevných mapách. Jednotlivé barvy značí příslušné p-hodnoty tak, jak je uvedeno u hodnocení signifikance formy vnějšího povrchu čelní kosti. Přičemž nejtmaší odstín modré vykazuje nejvyšší míru významnosti, a bílá barva označuje nevýznamné oblasti.

Ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti se statisticky významné rozdíly nacházejí v místech, které vykazují nejvýraznější tvarové rozdíly mezi muži a ženami (obrázek 30, 31). To znamená, že signifikantní je oblast glabely, nadobočních oblouků, čelních hrbolů a úzký pruh podél věncového švu. Dále pak také část horního okraje očních.



Obrázek 30. Vizualizace signifikantních oblastí ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled) (škála odpovídá p-hodnotám).



Obrázek 31. Vizualizace signifikantních oblastí ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola) (škála odpovídá p-hodnotám).

6.2 Analýza čelních dutin

Čelní dutiny jsou hodnoceny pomocí dvou markerů – objemu a povrchu. Obě dvě veličiny byly vypočítány v softwaru MeshLab. Poté bylo provedeno jejich statistické hodnocení v programu PAST. Na závěr byly otestovány možnosti predikce pohlaví v softwaru Morphome3cs uvedené v kapitole věnující se klasifikaci pohlaví.

6.2.1 Analýza objemu čelních dutin

6.2.1.1 Statistické hodnocení objemu čelních dutin

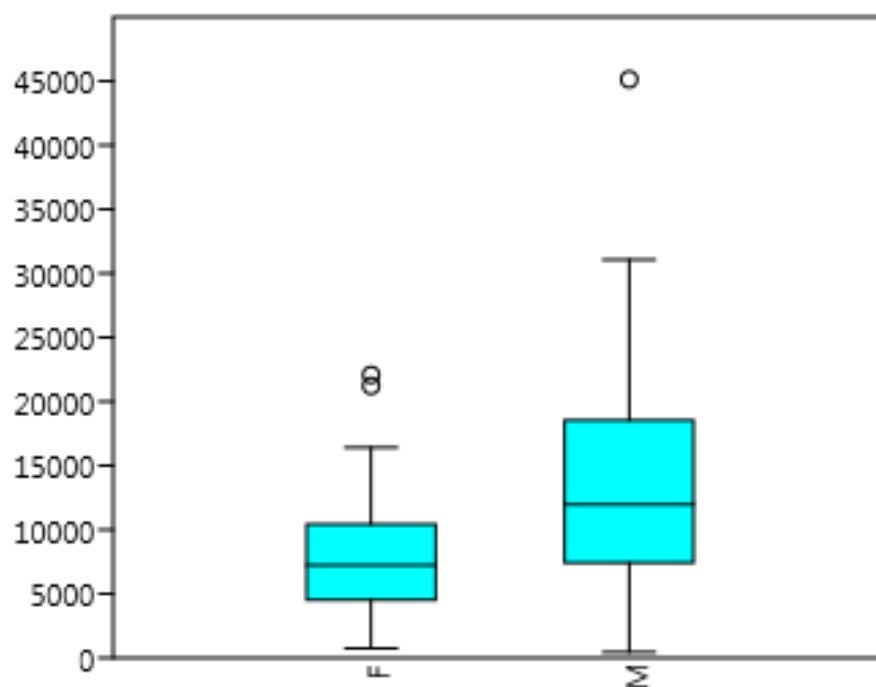
V první řadě bylo provedeno statistické hodnocení. Základní charakteristiku objemu čelních dutin našeho souboru jedinců současné české populace uvádí tabulka 5.

Tabulka 5. Statistická charakteristika objemu čelních dutin.

	Ženy N=45	Muži N=58
Minimální objem (mm³)	742,83	457,84
Maximální objem (mm³)	22079,82	45134,04
Průměrný objem (mm³)	7952,39	13578,56
Medián (mm³)	72222,85	11918,37

Z hodnot minimálního a maximálního objemu čelních dutin vyplývá větší variabilita u mužů než u žen.

Ve statickém programu PAST byl objem dutin podroben testu normality. Byl vykonán Shapiro-Wilk test, který odhalil, že ani u jedné skupiny pohlaví nemá objem normální rozložení v populaci. Poté, na základě Mann-Whitneyho U testu, bylo zjištěno, že mezi objemem čelních dutin u mužů a u žen je statisticky významný rozdíl. Hodnota signifikance je $p = 0,000157$. Hrubé rozdělení objemu v obou skupinách lze prezentovat pomocí „box-plotu“ (obrázek 32).



Obrázek 32. Rozdělení objemu čelních dutin (v mm³) mezi ženami (F) a muži (M) (p = 0,000157).

6.2.2 Analýza povrchu čelních dutin

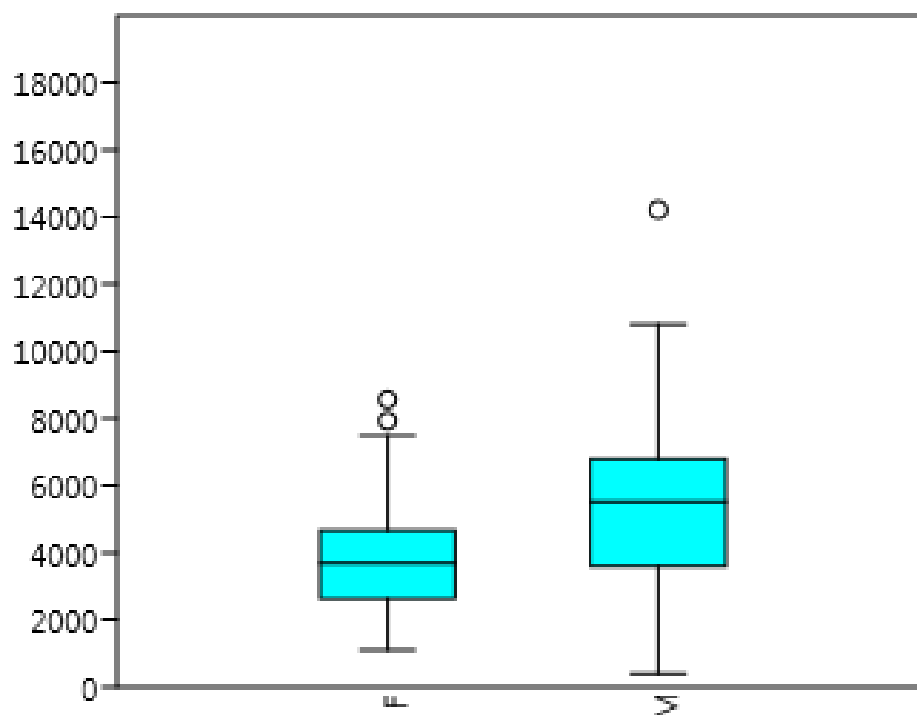
6.2.2.1 Statistické hodnocení povrchu čelních dutin

Statistickým hodnocením povrchu čelních dutin byla zjištěna jeho základní charakteristika u jedinců našeho souboru (tabulka 6). Vyšší variabilita byla nalezena u mužů.

Tabulka 6. Statistická charakteristika povrchu čelních dutin.

	Ženy N=45	Muži N=58
Minimální povrch (mm²)	1104,81	408,08
Maximální povrch (mm²)	8566,19	14212,96
Průměrný povrch (mm²)	3883,12	5485,25
Medián (mm²)	3676,60	5493,01

Test normality, Shapiro-Wilk, u povrchu poukázal, na rozdíl od objemu, na normální rozložení veličiny v populaci. Na základě dvouvýběrového T-testu byl potvrzen signifikantní rozdíl v povrchu čelních dutin mezi pohlavími, $p = 0,000666$. Rozdělení mezi oběma skupinami opět dokládá „box-plot“ (obrázek 33).



Obrázek 33. Rozdělení povrchu čelních dutin (v mm^2) mezi ženami (F) a muži (M) ($p = 0,000666$).

6.3 Klasifikace pohlaví

V softwaru Morphome3cs bylo pomocí metody Support vector machine s crossvalidací klasifikováno pohlaví na základě vnějšího povrchu čelní kosti, objemu a povrchu čelních dutin a současného využití obou struktur. Dále byla ověřena predikce pohlaví využitím metody Buluta et al. (2016) a logistické regrese, která byla aplikována také na poloměr křivosti povrchu čelní kosti.

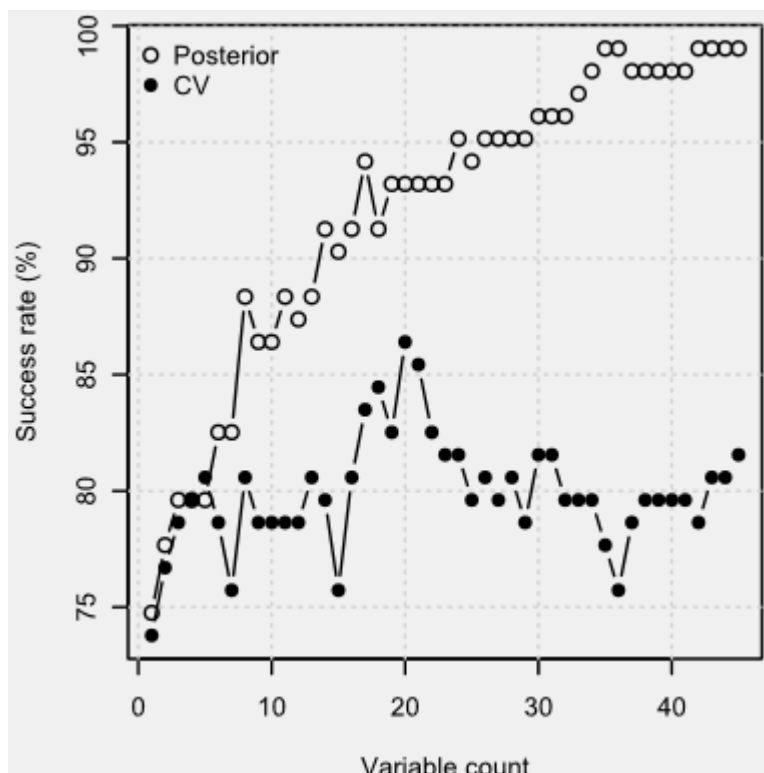
6.3.1 Klasifikace pohlaví na základě vnějšího povrchu čelní kosti

Metoda pro odhad pohlaví předkládána v této podkapitole pracuje s celým vnějším povrchem čelní kosti. Na upravené modely byla aplikována nejprve analýza hlavních

komponent. S využitím PCA skóre byla provedena analýza Support vector machine spolu s leave-one-out crossvalidací. Tento postup byl použit jak na formě, tak tvaru.

6.3.1.1 Klasifikace pohlaví na základě formy

Úspěšnost metody v analýze formy zobrazuje následující graf (obrázek 34), který prezentuje procentuální správnost klasifikace pohlaví, před („posterior“) a po (CV) crossvalidací, s využitím určitého počtu hlavních komponent.



Obrázek 34. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě formy vnějšího povrchu čelní kosti.

Důležitým ukazatelem je spodní křivka, označená jako CV, která ukazuje úspěšnost odhadu pohlaví po leave-one-out crossvalidaci, při které probíhá klasifikování každého jedince zvlášť pomocí metodologie vypracované na celém souboru. Ta ukazuje, jaká by byla úspěšnost na novém souboru.

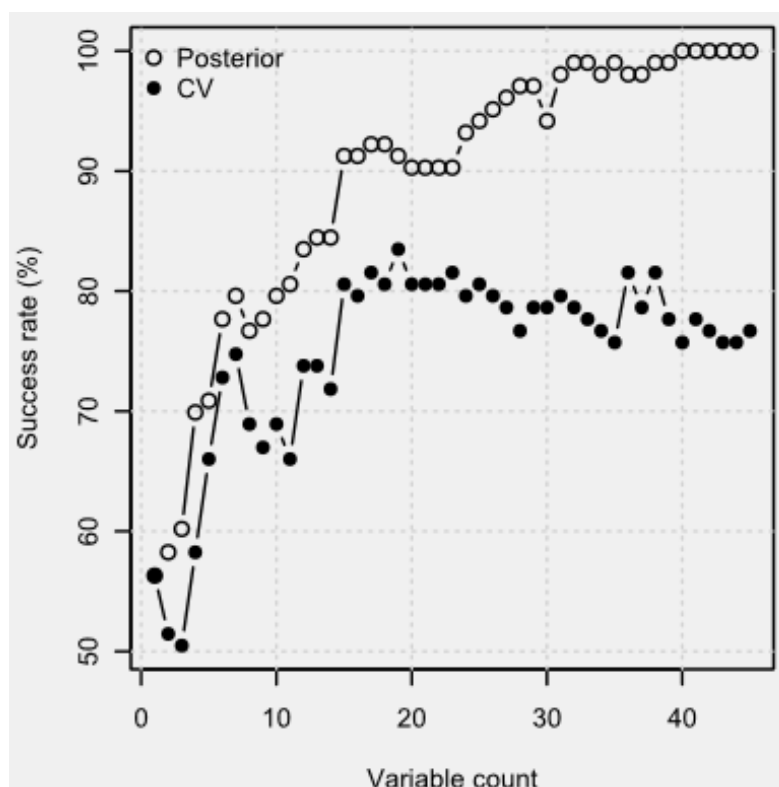
Nejlepší klasifikační model využívá 20 hlavních komponent. Úspěšnost jeho použití činí 86,41 % pro crossvalidaci. Celková úspěšnost („posterior“), 93,2 %, ukazuje správnost rozřazení jedinců v rámci celého našeho souboru. Tento model je využitelný pro ženy i muže ve stejné míře, jelikož jedince obou pohlaví zařadil s téměř stejnou přesností.

Podobně vysoké výsledky lze dosáhnout také pomocí 17, 18 nebo 21 komponent. Větší počet hlavních komponent klasifikaci zhoršuje.

Využití 20 PC sice přináší nejlepší výsledky predikce pohlaví, avšak využití tak velkého počtu komponent složité struktury, kterou je vnější povrch čelní kosti, by mohlo vést k přeučení klasifikátoru a způsobit jeho chybné využití na dalších souborech. Z grafu (obrázek 34) je patrné, že při použití 20 hlavních komponent se křivky celkové úspěšnosti a úspěšnosti po CV od sebe výrazněji vzdalují. Objektivnější výsledky by tedy měl přinést model, jehož úspěšnost celková a po crossvalidaci je podobná. Takový model využívá 5 hlavních komponent a přináší 80,58% úspěšnost po leave-one-out crossvalidaci. Muže je schopen zařadit nepatrně lépe než ženy.

6.3.1.2 Klasifikace pohlaví na základě tvaru

Podobně jako u formy byl využit klasifikátor pro predikci pohlaví na základě tvaru. Jeho úspěšnost zobrazuje následující graf (obrázek 35), který vypovídá o procentuální správnosti odhadu pohlaví s využitím určitého počtu hlavních komponent.



Obrázek 35. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě tvaru vnějšího povrchu čelní kosti.

Křivka CV ukazuje, že nejlepší úspěšnosti odhadu pohlaví po leave-one-out crossvalidaci lze dosáhnout s využitím 19 hlavních komponent. Ta činí 83,49 %, což je o necelých 6 % horší výsledek než u nejúspěšnějšího klasifikačního modelu založeného na formě. Celková úspěšnost („posterior“) s použitím 19 komponent nabývá 91,26 %, a to s nepatrně lepší pohlavní diagnostikou žen. Úspěšnosti klasifikace vyšší než 80 % po CV lze dosáhnout také například za použití 17, 18, 20, 21, 22 nebo 23 hlavních komponent.

Výsledek po crossvalidaci zmíněného nejlepšího modelu se neliší tak výrazně od jeho celkové úspěšnosti jako je tomu u modelu vytvořeného na formě. Přesto, pro předejití přeučení klasifikátoru a snížení chybovosti při jeho aplikaci na jiné soubory, je vhodné využít model založený na menším počtu PC. Zahrnutí 7 hlavních komponent do klasifikace přináší 74,75% správnost odhadu pohlaví po leave-one-out CV, přičemž pro muže a ženy je vhodný téměř stejně.

6.3.2 Klasifikace pohlaví pomocí metody Buluta et al. (2016) a poloměru křivosti čelní kosti

Porovnáním povrchu čelní kosti a povrchu koule byla zjištěna relativní velikost plochy čelní kosti, která je od koule vzdálena méně než 1 mm. Rozdíl mezi muži a ženami je ve zjišťované veličině signifikantní, jelikož p-hodnota činí $5,464 \times 10^{-8}$. Na základě zjištěných hodnot bylo pomocí logistické regrese klasifikováno pohlaví. Výsledek logistické regrese je rovněž signifikantní ($p = 2,81 \times 10^{-6}$). Úspěšnost predikce dosáhla 70,87 %. Hranice pro rozlišení, o které pohlaví se jedná, je 40,27 % povrchu čelní kosti, který je ke kouli blíže než 1 mm, přičemž ženy se nachází nad touto hranicí a muži pod ní. Minimální a maximální hodnoty, průměr a medián sledovaných ploch čelních kostí našeho souboru uvádí tabulka 7.

Tabulka 7. Minimální a maximální hodnoty, průměr a medián ploch (v %) čelních kostí, které jsou k povrchu koule blíže než 1 mm.

	Ženy	Muži
	N=45	N=58
Minimum (%)	29,86	11,17
Maximum (%)	60,59	55,72
Průměr (%)	43,90	33,42
Medián (%)	43,36	33,13

Z modelů vnějšího povrchu čelních kostí byly zjištěny poloměry křivosti. Rozdíly mezi pohlavími jsou signifikantní ($p = 6,327 \times 10^{-9}$). Zjištěné hodnoty byly využity ke klasifikaci pohlaví pomocí logistické regrese. Výsledky odhalily úspěšnost odhadu 77,66 %, přičemž hranice pro odlišení pohlaví činí 66,03 mm. Poloměr křivosti nacházející se nad touto hodnotou je zařazen jako mužský, naopak pod ní jako ženský. Závěry logistické regrese jsou statisticky významné ($p = 1,84 \times 10^{-6}$). Tabulka 8 prezentuje minima, maxima, průměr a medián poloměru křivosti mužů a žen studovaného souboru.

Tabulka 8. Minimální a maximální hodnoty, průměr a medián poloměru křivosti (v mm) čelních kostí.

	Ženy	Muži
	N=45	N=58
Minimum (mm)	57,05	61,47
Maximum (mm)	70,48	75,77
Průměr (mm)	64,72	68,51
Medián (mm)	64,64	68,27

6.3.3 Klasifikace pohlaví na základě čelních dutin

V objemu i povrchu čelních dutin byl mezi muži a ženami zjištěn signifikantní rozdíl. Z toho důvodu byl pomocí obou zmíněných markerů aplikován klasifikátor a byly ověřeny možnosti predikce pohlaví.

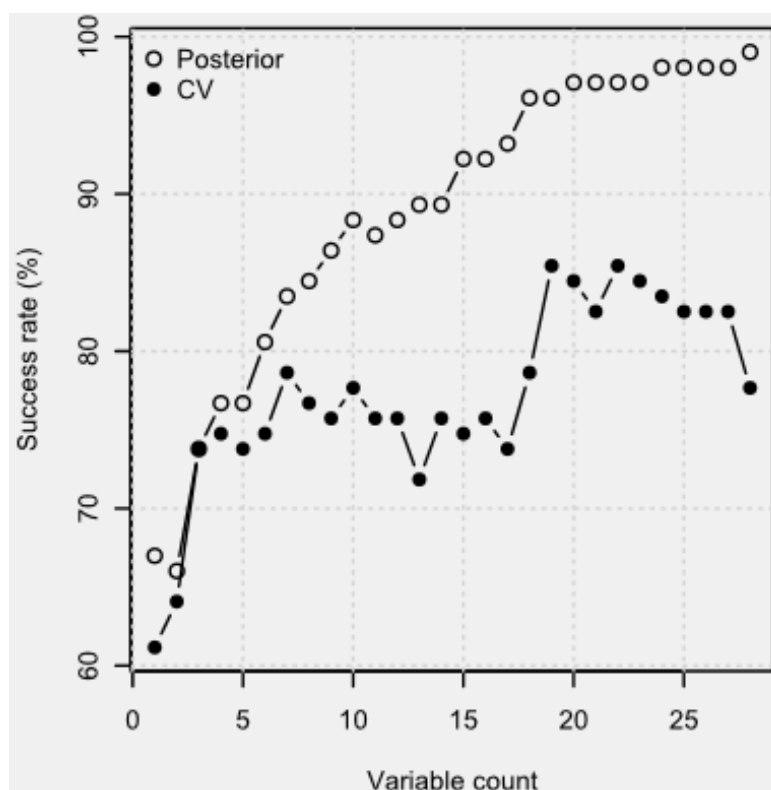
Na základě objemu a povrchu čelních dutin bylo dosaženo celkové úspěšnosti klasifikace 65,05 %. Predikce pohlaví dosáhla lepších výsledků při diagnostice žen. O 3 % horší klasifikace u mužů může být vysvětlena vyšší variabilitou objemu a povrchu čelních dutin, která byla již zmíněna u statistického hodnocení dutin (tabulka 5, 6). Úspěšnost po crossvalidaci činí 64,07 %.

6.3.4 Klasifikace pohlaví na základě čelní kosti a čelních dutin

Úspěšnost klasifikace byla testována současným využitím vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin.

Nejprve byla provedena klasifikace pomocí objemu a povrchu čelních dutin a skóre hlavních komponent formy vnějšího povrchu čelních kostí, jejíž úspěšnost před a po

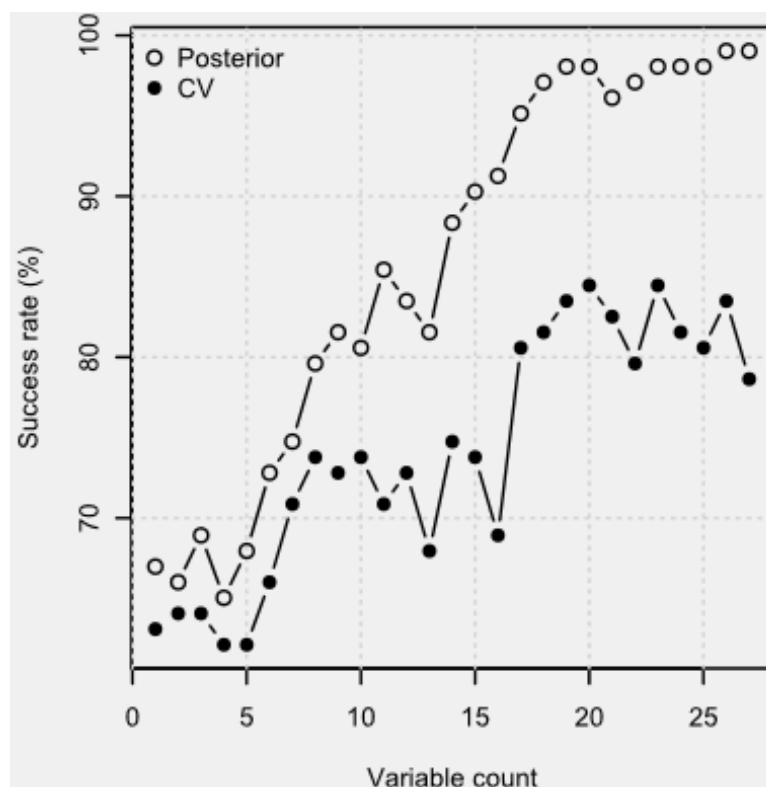
crossvalidaci prezentuje obrázek 36. Nejlepší klasifikační model dosáhl celkové úspěšnosti 96,12 %, přičemž nesprávně zařadil dva muže a dvě ženy. Celková úspěšnost klasifikace pohlaví v našem souboru je tak o necelá 3 % vyšší při použití formy vnějšího povrchu čelní kosti spolu s objemem a povrchem čelních kostí než při odhadu pohlaví na základě samotné formy vnějšího povrchu čelní kosti. Po crossvalidaci se správnost klasifikace však snížila na 85,43 %, čímž nepředčila správnost klasifikace na základě pouhé formy povrchu čelní kosti. V případě, že by byl použit méně úspěšný klasifikační model, který však využívá menší počet hlavních komponent a zabraňuje přeučení klasifikátoru, dojde ke zlepšení klasifikace při současném použití struktur v celkové úspěšnosti o necelých 7 % a po CV o 1 % oproti odhadu na základě samotné formy vnějšího povrchu čelní kosti.



Obrázek 36. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě současného použití formy vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin.

Dále byla ověřena klasifikace pohlaví pomocí objemu a povrchu čelních dutin a zároveň skóre hlavních komponent tvaru vnějšího povrchu čelních kostí. Úspěšnost metody s využitím určitého počtu komponent zobrazuje obrázek 37. Nejlepší klasifikační model dospěl k celkové úspěšnosti 98,05 % s nesprávným zařazením 2 mužů.

Po crossvalidaci však jeho správnost klesla na 84,46 %. I přes tento výraznější pokles se jedná o vyšší úspěšnost klasifikace po CV o necelé 1 % oproti odhadu na základě samotného tvaru vnějšího povrchu čelní kosti. Při použití klasifikačního modelu využívajícího menší počet hlavních komponent zvýšilo současné využití obou struktur pouze celkovou úspěšnost, a to o 6,8 %, nicméně po crossvalidaci má lepší výsledek aplikace samotného tvaru povrchu čelní kosti téměř o 1 %.



Obrázek 37. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě současného použití tvaru vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin.

Souhrn všech výsledků klasifikace pohlaví provedené v předkládané práci uvádí tabulka 9.

Tabulka 9. Výsledky nejúspěšnějších klasifikačních modelů založených na jednotlivých proměnných předložených v práci.

	Celková úspěšnost (%)	Úspěšná klasifikace žen (%)	Úspěšná klasifikace mužů (%)	Nejúspěšnější model po CV (%)
Forma vnějšího povrchu čelní kosti	93.20	93.33	93.10	86.41
Tvar vnějšího povrchu čelní kosti	91.26	93.33	89.65	83.49
Čelní dutiny (objem + povrch)	65.05	66.66	63.79	64.07
Forma čelní kosti + čelní dutiny	96.12	95.55	96.55	85.43
Tvar čelní kosti + čelní dutiny	98.05	100	96.55	84.46
Metoda Buluta et al. (2016)	70,87	-	-	-
Poloměr křivosti čelní kosti	77,66	-	-	-

7 DISKUZE

Diplomová práce se věnuje hodnocení pohlavního dimorfismu na základě vnější i vnitřní morfologie čelní kosti pomocí metod geometrické morfometrie. V kontextu forenzní antropologie, ale také bioarcheologie, se odhadem pohlaví zabývá řada autorů s cílem nalézt veškeré možné varianty přístupů a dospět k co nejúspěšnější klasifikaci pohlaví na základě lidských kosterních pozůstatků. Čelní kost představuje strukturu, která nese významné pohlavně dimorfní znaky (Walker, 2008; Dempf & Eckert, 2010; Shearer et al., 2012), které umožňují hodnocení rozdílů mezi muži a ženami. Pohlavní dimorfismus čelní kosti lze sledovat na základě morfoskopického hodnocení (např. Krogman, 1962; Lewis & Garvin, 2016), rozměrů (např. Shearer et al., 2012), množiny landmarků (např. Bigoni et al., 2010; Perlaza, 2014), křivek (Hochstein, 2014) nebo exokraniálního povrchu (Musilová et al., 2016; Bulut et al., 2016), či současným využitím exokrania s endokraniem (Fatah et al., 2014).

Hodnocení pohlavního dimorfismu na základě vnějšího povrchu čelní kosti metodologicky vychází ze studie Musilové et al. (2016), která využívala exokraniální povrch celé lebky. Její výsledky potvrdily, že ve formě i tvaru patří čelní kost mezi nejvíce pohlavně dimorfní oblasti lebky. Ve formě je nejvíce signifikantní dolní část čelní kosti – glabella a nadoboční oblouky. Tento výstup podporuje též další práce využívající celý povrch lebky (Fatah et al., 2014). V tvaru je pak pozorován významný rozdíl v horní polovině kosti, zejména mezi čelními hrboly (Musilová et al., 2016). Tyto závěry potvrdilo i námi aplikované testování signifikantnosti, které ověřilo rozdíly nalezené metodou „Compare groups“, která srovnává povrch mužské a ženské čelní kosti vůči sobě. Analýza formy vnějšího povrchu čelní kosti ukázala, že nejvíce signifikantní je skutečně oblast glabely a nadobočních oblouků, navíc pak ještě laterální strany a části ležící při *sutura coronalis*. Všechna tato místa, která byla vyhodnocena jako statisticky významná, jsou výraznější a více prominující u mužů. Co se týče tvaru čelní kosti, naše studie dokládá významnost střední části čelní šupiny v blízkosti čelních hrbolů, avšak potvrzuje signifikantní rozdíl také glabely, nadobočních oblouků a části čelní kosti při věncovém švu okolo bodu *bregma*.

Výsledky našeho hodnocení pohlavního dimorfismu pomocí nástroje „Compare groups“ jsou v souladu s předchozími morfometrickými studiemi, které se zabývaly dolní

částí čelní kosti v souvislosti s pohlavím. Jejich závěry poukazují na silnou expanzi glabely a nadobočních oblouků u mužů (Garvin & Ruff, 2012; Shearer et al., 2012; Perlaza, 2014). I my jsme dospěli k výsledku, že ve tvaru i formě jsou muži oproti ženám výraznější v nadobočních obloucích a oblasti glabely. Metoda analyzující celý povrch čelní kosti, respektive její zaoblení vůči zakřivení koule modelované softwarem, ukazuje, že kromě glabely a nadobočních oblouků se od povrchu koule navíc odchyľují čelní hrboly, lícni výběžky a spánkové plochy. Poslední dvě uvedené oblasti se podle zmíněné práce u obou pohlaví mírně překrývají, avšak laterální části čelní kosti jsou o něco výrazněji odchyľené směrem do negativních hodnot (dovnitř koule) u mužů a lícni výběžky více do kladných hodnot (zevním směrem) u žen (Bulut et al., 2016). Tyto závěry naše výsledky hodnocení formy prezentované barevnými mapami nepodporují, naopak mají opačnou tendenci. Zobrazují totiž jednoznačnou prominenci laterálních stran čelních kostí ve prospěch mužů, a navíc také výraznost lícních výběžků vyšší u mužů než u žen. V pohlavním dimorfismu těchto oblastí hraje důležitou roli velikost, jelikož v samotném tvaru jsou lícni výběžky a laterální části v naší studii vyhodnoceny jako neutrální, bez signifikantních mezipohlavních rozdílů, což přispívá k závěrům Buluta et al. (2016), který zde shledal jen mírné odlišnosti. Zásadní rozdíly však byly nalezeny v oblasti čelních hrbolů, které od povrchu koule odstupují výrazněji u žen (Bulut et al., 2016). Prominenci *tubera frontalia* u ženských čelních kostí potvrzuje také naše analýza formy i tvaru, avšak pouze v tvaru je tato oblast signifikantní. Výraznost nadobočních oblouků a glabely u mužů a čelních hrbolů u žen lze také dokázat hodnocením čelní kosti pomocí křivek charakterizující zakřivení zmíněných oblastí (Hochstein, 2014). Morfoskopické metody popisují ženskou čelní kost jako vertikální a mužskou ustupující. Ženy mají na rozdíl od mužů plnější a zaoblené čelo (Keen, 1950; Krogman, 1962; Russell et al., 1985). Větší zaoblení u žen podporuje výraznější prominence čelních hrbolů, která vertikalizuje postavení čelní kosti. Naopak muži mají šikmé ustupující čelo. S těmito tvrzeními jsou v souladu i naše výsledky. Ve formě se u mužů kraniálním směrem od střední části čelní šupiny postupně zvyšuje eminence s vrcholem podél věncového švu, podél kterého je zřetelné vyklenutí oproti ženám. Při hodnocení pohlavního dimorfismu zmíněné oblasti je třeba brát ohled na fakt, že ve formě horní části čelní kosti dochází ke snížení projevu mezipohlavních rozdílů vlivem věku (Musilová et al., 2016). Ve tvaru je rovněž patrné zvýšení strmosti koncové části šupiny při *sutura coronalis* v oblasti bregmy u mužů. Oproti výše zmíněným studiím naše práce poskytuje hodnocení také horního okraje očních.

Ve formě je po přechodu z nadobočního oblouku do očnice více vyklenutá ženská kost, avšak statisticky významná je pouze mediální část. Ve tvaru, po odšalování velikosti, se pohlavní dimorfismus na horním okraji očnic projevuje ve prospěch mužů, ale směrem do očnice tvar nevykazuje rozdíly.

Variabilita vnějšího povrchu čelní kosti našeho souboru byla hodnocena pomocí analýzy hlavních komponent. Výsledky PCA formy ukázaly, že významný podíl na variabilitě tvoří první čtyři komponenty, které nesou 89,61 %. Variabilita v PC1 a PC2 se mezi pohlavími značně překrývá, avšak muži vykazují mírně větší posun do záporných hodnot první komponenty a kladných hodnot v druhé komponentě. To naznačuje, že mužská čelní kost je větší než ženská a zároveň pozvolna ustupující od nadobočních oblouků kraniálním směrem. Naopak ženy se vyznačují prominencí v oblasti čelních hrbolů, což stírá rozdíly mezi vyklenutím čelních hrbolů a nadobočních oblouků a vytváří vertikální postavení čela. Uvedené výsledky jsou v souladu se závěry popsány v předchozích odstavcích. Druhá hlavní komponenta kromě strmosti čelní kosti ovlivňuje také její šířku. Muži mají vzhledem ke kladnému posunu na ose PC2 širší čelní kost, jejíž laterální spánkové části vypadají mohutněji než ženské. Tato tendence neodpovídá popisu čelní kosti, který uvádí, že ženská čelní kost je širší než mužská (Keen, 1950). Třetí hlavní komponenta však také ovlivňuje šířku čelní kosti a přispívá k celkové variabilitě téměř stejným podílem jako druhá, a způsobuje zúžení a prodloužení čelní kosti v záporných hodnotách, které odpovídají spíše mužům. Nutno poznamenat, že variabilita mužů a žen se ve třetí a čtvrté komponentě výrazně překrývá, avšak právě ve třetí komponentě dochází k rozšíření variability mužů negativním směrem, který se projevuje zúžením. Vliv PC3 pak tedy odpovídá poznatkům Keena (1950) o větší šířce ženské čelní kosti.

Analýza hlavních komponent byla provedena i pro zhodnocení variability samotného tvaru vnějšího povrchu čelní kosti. Prvních pět hlavních komponent má na celkové variabilitě nejvýznamnější podíl – 80,17 %. V první a druhé komponentě je variabilita u žen menší než u mužů. Co se týče první hlavní komponenty, která ovlivňuje šířku čelní kosti a její zakřivení a vyklenutí, posun více mužským směrem se vyznačuje zvýrazněním nadobočních oblouků a větší strmostí horní poloviny čelní šupiny a rozšířením kraniální části čelní kosti. V druhé komponentě pak muži zaujímají záporné hodnoty podobně jako ženy, ale nabývají výrazněji kladných hodnot, které způsobují zúžení a prodloužení čelní kosti, její větší strmost a z laterálního pohledu patrné oploštění střední části čelní šupiny

okolo čelních hrbolů. Třetí až pátá PC přispívá ke zmenšení celkové šířky čelní kosti a ke zúžení v jejím nejužším místě mezi body *frontotemporale*, ale také ke zvýraznění nadobočních oblouků v hodnotách, které zahrnuje ve větší míře mužská variabilita.

V poslední části výsledků byla prezentována klasifikace pohlaví na základě formy a tvaru vnějšího povrchu čelní kosti, pomocí metody Buluta et al. (2016), poloměru křivosti čelní kosti, objemu a povrchu čelních dutin a odhad pohlaví s pomocí čelní kosti a čelních dutin současně.

Na základě formy vnějšího povrchu čelní kosti bylo dosaženo největší úspěšnosti klasifikace pohlaví – 86,41 % po crossvalidaci. Tento model využívá 20 hlavních komponent. Analýza tvaru nabyla nejlepších výsledků při užití 19 komponent, a to 83,49 % po CV. Výstupy vypovídají o tom, že zahrnutí velikosti do odhadu pohlaví má významný vliv na zvýšení správnosti klasifikace, což potvrzují další studie věnující se formě a tvaru (Fatah et al., 2014; Musilová et al., 2016). Ve srovnání se studiemi hodnotící pohlavní dimorfismus čelní kosti dosahuje klasifikace pomocí celého vnějšího povrchu čelní kosti prezentované v předkládané práci mírně lepších výsledků. Kvantifikace nadobočních oblouků umožnila správnou klasifikaci v necelých 80 % po crossvalidaci (Garvin & Ruff, 2012). Odhad pohlaví na základě zakřivení čelní kosti zachycené pomocí křivek vedených mediálně přes region glabella a laterálně přes největší prominenci nadobočních oblouků dosáhlo úspěšnosti přibližně 79 %, přičemž ženy byly zařazeny podstatně lépe než muži (Hochstein, 2014). Oproti tomu, naše metoda založená na formě je nástrojem vhodným pro obě pohlaví s téměř stejnou přesností. Ve tvaru byly ženy klasifikovány jen nepatrně lépe než muži. V porovnání s neladmarkovou metodou hodnotící tvar čelních kostí vůči zakřivení povrchu koule dosahuje náš klasifikační model vyšší úspěšnosti téměř o 6 %. Co se týče klasifikace po odšalování velikosti, naše výsledky korespondují se závěrem metody, která provádí geometricko-morfometrické hodnocení tvaru na laterálních rentgenových snímcích lebek a dosáhla 84,31% úspěšnosti, čím předčila naši metodu jen o necelé 1 % (Perlaza, 2014).

Nejúspěšnější klasifikační modely založené na vnějším povrchu čelní kosti dosahují nižší úspěšnosti než modely pracující s celou lebkou. Metodologicky podobná studie hodnotící exokraniální povrch lebky překročila úspěšnost nad 90 % po crossvalidaci za využití formy a 87 % pomocí tvaru. K podobně vysokým výsledkům klasifikace pohybující se mírně nad 90 % lze také dospět na základě analýzy šesti rozměrů lebky –

maximální lebeční délky, bizygomatické šířky, baurikulární šířky, nasální výšky, biorbitální šířky a pravé mastoidální délky (Mahakkanukrauh et al., 2015). Nicméně, mnohem vyšší míru úspěšnosti odhadu pohlaví přesahující 97 % umožňuje metoda využívající exokranium v kombinaci s endokraniem, pravděpodobně z toho důvodu, že tloušťka lebečních kostí je vysoce pohlavně dimorfní (Fatah et al., 2014). Nižší diskriminační síla izolované části lebky je dána menším množstvím regionů, které nesou projev pohlavního dimorfismu. Čelní kost tvoří pouhou část celkového dimorfismu lebky. Porovnání úspěšnosti čelní kosti s ostatními strukturami lebky dokladuje, že čelní kost patří mezi nejvíce dimorfní oblasti spolu s dolní čelistí (Giles, 1964; Gamba et al., 2016). Oblast bradavkovitého výběžku, *foramen magnum* nebo týlní kondyly poskytují nástroje pohlavní diagnózy s přesností pohybující se přibližně v rozmezí 65 – 76 % (Kemkes & Göbel, 2006; Gapert et al., 2009a; Gapert et al., 2009b; Madadin et al., 2015).

Při hodnocení pohlavního dimorfismu je nutné mít na vědomí, že lebka je populačně specifická (Bruzek & Murail, 2006). Naše klasifikační modely jsou vypracovány na české populaci. Pro ověření její úspěšnosti na jiných souborech by bylo potřeba ji testovat. Nicméně, pro zvýšení objektivitu výsledků s ohledem na používání klasifikace na jiných vzorcích, jsme vytvořili modely, které sice nedosahují tak vysokých výsledků predikce jako nejlepší klasifikační modely, zato využívají menší počet hlavních komponent, čímž lze předejít přeučení klasifikátoru a snížení chybovosti. Takový model založený na formě pracuje s 5 PC a přináší 80,58% úspěšnosti po crossvalidaci, přičemž muž je schopen zařadit nepatrně lépe. Model predikce na základě tvaru tvořený 7 komponentami umožňuje 74,75% správnost odhadu a je téměř stejně vhodný pro obě pohlaví.

V předkládané práci byla ověřena metoda Buluta et al. (2016), která porovnává povrch čelní kosti a povrch koule a zjišťuje relativní velikost plochy čelní kosti, která je od koule vzdálena méně než 1 mm. Původní metoda byla aplikována na tureckou populaci a dosáhla úspěšnosti 77,5 %. Při jejím použití na české populaci nebyla tak úspěšná, jelikož výsledkem byla správnost klasifikace pouze 70,87 %. Zajímavé je, že plocha ve vzdálenosti do 1 mm od povrchu koule vychází v naší studii přesně naopak než u analýzy čelní kosti tureckého souboru. V té sledovaná plocha zaujímá u mužů 43,2 % a u žen 33,9 %, v naší práci činí u mužů 33,42 % a u žen 43,9 %. Plocha nabývá tedy podobných hodnot relativní velikosti, avšak v naší studii odpovídá větší plocha ženám a menší mužům, kdežto v práci Buluta et al. (2016) je tomu opačně.

Pro kompletnost klasifikace pohlaví na základě povrchu čelní kosti byla provedena také predikce pomocí poloměru křivosti čelní kosti. Použití této proměnné umožnilo dosažení úspěšnosti 77,66 %. Vzhledem k ostatním výsledkům odhadu uvedených v předkládané práci lze zhodnotit, že tato metoda se svou úspěšností pohybuje mezi výše zmíněnými metodami – klasifikací pomocí metody Buluta et al. (2016) a hodnocení celého vnějšího povrchu čelní kosti. Nicméně, ani jedna z metod klasifikace pohlaví předložená v naší studii nedosahuje 95 % míry spolehlivosti stanovené pro forenzní případy (Bruzek & Murail, 2006).

Součástí práce bylo také hodnocení čelních dutin provedené na základě jejich objemu a povrchu. Mezi pohlavími je signifikantní rozdíl v objemu a povrchu čelních dutin. Úspěšnost predikce činí 64,07 % po crossvalidaci. Nízká přesnost klasifikace je důsledkem vysoké variability uvnitř souboru. Metoda správně klasifikovala 66,66 % žen a 63,79 % mužů. Nižší správnost klasifikace u mužů může být vysvětlena vyšší variabilitou objemu i povrchu čelních dutin českých mužů. Vyšší variabilitu objemu čelních dutin u mužů studie prováděná na francouzské populaci nepotvrzuje (Michel et al., 2015). Ve srovnání s ostatními metodami věnujícími se čelním dutinám vykazují naše výsledky podobnou míru úspěšnosti. Pomocí indexu čelních dutin je možné z laterálních kefalometrických rentgenových snímků pohlaví rozlišit s 67,5% přesností (Sai Kiran et al., 2014) a z 3D modelů vytvořených na základě CT snímků v rozmezí 63 – 77% úspěšností (Benghiac et al., 2015). Diskriminace pohlaví na základě objemu byla také již ověřována, a to navíc ve vztahu k věku. Studie prokázala možnosti klasifikace s úspěšností 72,5 % bez negativního dopadu stárnutí (Michel et al., 2015). Fakt, že věk neovlivňuje objem dutin, je přínosný i z hlediska naší studie. My jsme kromě objemu dutin použili také povrch, abychom přidali další proměnnou, na základě které bude možné analýzu provést. I přes použití dvou markerů jsme však dosáhli nižší úrovně úspěšnosti, kterou lze odůvodnit jak vysokou variabilitou v populaci, tak rovněž populační specifitou, jelikož původní studium objemu bylo provedeno na odlišné populaci.

Na závěr bylo provedeno ověření, zdali dojde ke zvýšení úspěšnosti predikce pohlaví současným použitím čelní kosti a čelních dutin. Při použití formy vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin byla dosažena celková úspěšnosti 96,12 %, čímž došlo ke zlepšení celkové úspěšnosti samotné formy povrchu čelní kosti o necelá 3 %. Po

crossvalidaci však došlo k poklesu na 85,43 %, čímž klasifikace nepředčila správnost na základě pouhé čelní kosti. V případě klasifikačního modelu, který vychází z menšího počtu hlavního komponent, dojde ke zlepšení klasifikace při současném použití struktur v celkové úspěšnosti o téměř 7 % a po crossvalidaci o 1 %.

Propojení tvaru vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin umožní predikci pohlaví nejlépe na 98,05 %. I když po crossvalidaci úspěšnost klesla na 84,46 %, jedná se o lepší výsledek o necelé 1 %, než který byl dosažen pomocí nejlepšího klasifikačního modelu založeného na tvaru čelní kosti. Využití obou struktur mírně posílilo postavení metody a nepatrně předčilo predikci založenou na hodnocení tvaru na laterálních rentgenových snímcích lebek (Perlaza, 2014), na jejíž úspěšnost samotný tvar ztrácí necelé 1 %. Snížení počtu hlavních komponent zvýšilo pouze celkovou úspěšnost o 6,8 %, ale po crossvalidaci zůstává vhodnější samotný tvar čelní kosti o téměř 1 % než jeho kombinace s čelními dutinami.

V některých modelech, jak rozepisují výše, došlo za využití čelní kosti a čelních dutin ke zvýšení přesnosti klasifikace, avšak výraznější zlepšení lze dosáhnout pouze v celkové úspěšnosti. Po crossvalidaci zlepšení poklesne a pohybuje se pouze do 1 %.

8 ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce se zabývala hodnocením pohlavního dimorfismu vnější i vnitřní morfologie čelní kosti. Studium pohlaví na základě vnějšího povrchu čelních kostí a objemu a povrchu čelních dutin bylo prováděno pomocí metod geometrické morfometrie aplikovaných na trojrozměrné modely vytvořené segmentací a úpravou souboru CT snímků hlav 103 jedinců současné české populace. Nejprve bylo pro formu i tvar provedeno zhodnocení variability vnějšího povrchu čelních kostí a poté projevy a síla pohlavního dimorfismu. Na základě skóre hlavních komponent formy a tvaru vnějšího povrchu čelní kosti bylo klasifikováno pohlaví. Poté jsme ověřovali metodu predikce pohlaví navrženou Bulutem et al. (2016) v české populaci. Klasifikace pohlaví byla provedena také na základě poloměru křivosti povrchu čelní kosti. Věnovali jsme se rovněž zhodnocení pohlavního dimorfismu čelních dutin. Na závěr bylo otestováno, zda současné využití čelní kosti a čelních dutin zvýší úspěšnost klasifikace.

Diplomová práce dospěla k následujícím závěrům:

- Statisticky významné rozdíly v projevu pohlavního dimorfismu byly prokázány ve formě i tvaru vnějšího povrchu čelní kosti.
- Velikost je důležitý faktor pohlavního dimorfismu, jelikož ve formě čelní kosti vykazují výraznějších rozdílů než v samotném tvaru, který se vyznačuje mírnějším projevem.
- Nejúspěšnější klasifikační model založený na formě vnějšího povrchu čelní kosti dosáhl 86,41 % po crossvalidaci a přesáhl úspěšnost modelu používajícího tvar o 2,92 %.
- Klasifikace pohlaví pomocí metody navržené Bulutem et al. (2016) dosáhla v českém souboru úspěšnosti 70,87 %, což je téměř o 7 % nižší správnost predikce, než která byla docílená v turecké populaci.

- Objem i povrch čelních dutin vykazuje statisticky významné rozdíly mezi pohlavími českého souboru.
- Klasifikace pohlaví na základě objemu a povrchu čelních dutin dosáhla úspěšnosti 64,07 % po crossvalidaci.
- Současné použití formy vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin zvýšilo celkovou úspěšnost nejlepšího klasifikačního modelu o 2,79 %.
- Současné využití tvaru vnějšího povrchu čelní kosti a objemu a povrchu čelních dutin zvýšilo celkovou úspěšnost klasifikace nejlepšího klasifikačního modelu o 6,79 % a úspěšnost po crossvalidaci o 0,97 %.

Hypotézy tedy byly zodpovězeny následujícím způsobem:

1. Povrch čelní kosti bude mít nižší diskriminační sílu než povrch celé lebky – **potvrzena**. Nejúspěšnější klasifikační modely založené na vnějším povrchu čelní kosti dosahují nižší úspěšnosti než modely pracující s celou lebkou. Nižší diskriminační síla izolované části lebky je dána menším množstvím regionů, které nesou projev pohlavního dimorfismu. Čelní kost tvoří pouhou část celkového dimorfismu lebky.
2. Současné využití vnějšího povrchu čelní kosti a čelních dutin zvýší přesnost klasifikace – **částečně vyvrácena**. V případě formy vnějšího povrchu čelní kosti došlo ke zlepšení celkové úspěšnosti nejlepšího klasifikačního modelu. Při použití tvaru vnějšího povrchu čelní kosti se zvýšila jak úspěšnost celková, tak i po crossvalidaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459.
- Agresti, A. (2002). Logistic regression. In *Categorical data analysis* (Second, pp. 165–196). Florida: John Wiley & sons, Inc.
- Akhlaghi, M., Bakhtavar, K., Moarefdoost, J., Kamali, A., & Rafeifar, S. (2016). Frontal sinus parameters in computed tomography and sex determination. *Legal Medicine*, 19, 22–27.
- Albessard, L., Grimaud-Hervé, D., & Balzeau, A. (2016). Evolution of cranial and endocranial profiles in Homo species: A study in 2D geometric morphometrics. *Bmsap*, 28(3–4), 118–131.
- Altman, K. (2012). Facial feminization surgery: Current state of the art. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 41, 885–894.
- Amores-Ampuero, A. (2017). Sexual dimorphism in base of skull. *Anthropol. Anz. J. Biol. Clin. Anthropol*, 74(1), 9–14.
- Andersson, M. B. (1994). *Sexual selection*. Princeton University Press.
- Aslier, N. G. Y., Karabay, N., Zeybek, G., Keskinoglu, P., Kirai, A., Sütay, S., & Ecevit, M. C. (2016). The classification of frontal sinus pneumatization patterns by CT-based volumetry. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 38(8), 923–930.
- Beaini, T. L., Duailibi-Neto, E. F., Chilvarquer, I., & Melani, R. F. H. (2015). Human identification through frontal sinus 3D superimposition: Pilot study with Cone Beam Computer Tomography. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 36, 63–69.
- Bejdová, Š., Dupej, J., Krajíček, V., Velemínská, J., & Velemínský, P. (2017). Stability of upper face sexual dimorphism in central European populations (Czech Republic) during the modern age. *International Journal of Legal Medicine*, 1–10.
- Bejdová, Š., Krajíček, V., Velemínská, J., Horák, M., & Velemínský, P. (2013). Changes in the sexual dimorphism of the human mandible during the last 1200 years in Central Europe. *HOMO- Journal of Comparative Human Biology*, 64, 437–453.
- Belaldavar, C., Kotrashetti, V. S., Hallikerimath, S. R., & Kale, A. D. (2014). Assessment of frontal sinus dimensions to determine sexual dimorphism among Indian adults. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 6, 25–30.

- Benghiac, A., Thiel, B. A., & Haba, D. (2015). Reliability of the frontal sinus index for sex determination using CBCT. *Romanian Society of Legal Medicine*, 23, 275–278.
- Besana, J. L., & Rogers, T. L. (2010). Personal identification using the frontal sinus. *Journal of Forensic Sciences*, 55(3), 584–589.
- Bidmos, M., Gibbon, V., & Štrkalj, G. (2010). Recent advances in sex identification of human skeletal remains in South Africa. *South Africa Journal of Science*, 106(11/12), 1–6.
- Bigoni, L., Velemínská, J., & Brůžek, J. (2010). Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *HOMO- Journal of Comparative Human Biology*, 61(1), 16–32.
- Birkby, W. H. (1966). An evaluation of race and sex identification from the cranial measurements. *American Journal of Physical Anthropology*, 24, 21–28.
- Black, S., & Ferguson, E. (2011). *Forensic anthropology*. Boca Raton: CRC Press.
- Blau, S., & Ubelaker, D. (2009). *Handbook of forensic anthropology and archeology*. New York: Left Coast Press.
- Bookstein, F. L. (1997). Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, 1(3), 225–243.
- Bookstein, F., Schäfer, K., Prossinger, H., Seidler, H., Fieder, M., Stringer, C., ... Marcus, L. F. (1999). Comparing frontal cranial profiles in archaic and modern Homo by morphometric analysis. *Anatomic Record*, 257, 217–224.
- Bruner, E. (2015). *Human paleoneurology*. Springer International Publishing Switzerland.
- Bruner, E., Athreya, S., Cue, M. De, & Marks, T. (2013). Geometric variation of the frontal squama in the genus homo: Frontal bulging and the origin of modern human morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, 150(2), 313–323.
- Bruzek, J. (2002). A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 117, 157–168.
- Bruzek, J., & Murail, P. (2006). Methodology and reliability of sex determination from the skeleton. In A. Schmitt, E. Cunha, & J. Pinheiro (Eds.), *Forensic Anthropology and Medicine: Complementary Sciences From Recovery to Cause of Death* (pp. 225–242). New Jersey: Humana Press Inc.

- Brzobohatá, H., Krajíček, V., Horák, Z., & Velemínská, J. (2015). Sex classification using the three-dimensional tibia form or shape including population specificity approach. *Journal of Forensic Sciences*, 60(1), 29–40.
- Buikstra, J., & Ubelaker, D. (1994). Standards for data collection from human skeletal remains. In *Seminar at The Field Museum of Natural History*.
- Bulut, O., Petaros, A., Hizliol, I., Wärmländer, S. K. T. S., & Hekimoglu, B. (2016). Sexual dimorphism in frontal bone roundness quantified by a novel 3D-based and landmar-free method. *Forensic Science International*, 261, 162.e1-162.e5.
- Bulygina, E., Mitteroecker, P., & Aiello, L. (2006). Ontogeny of facial dimorphism and patterns of individual development within one human population. *American Journal of Physical Anthropology*, 131, 432–443.
- Byers, S. N. (2015). *Introduction to forensic anthropology*. Taylor and Francis.
- Caple, J., & Stephan, C. N. (2016). Photo-Realistic Statistical Skull Morphotypes: New Exemplars for Ancestry and Sex Estimation in Forensic Anthropology. *Journal of Forensic Sciences*.
- Cawley, G. C. (2006). Leave-one-out cross-validation based model selection criteria for weighted LS-SVMs. *International Joint Conference on Neural Network*, 1661–1668.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-Vector Networks. *Machine Learning*, 20, 273–297.
- Cunningham, C., Scheuer, L., & Black, S. (2016). *Developmental juvenile osteology* (2nd ed.). Londýn: Academic Press.
- Čihák, R. (2011). *Anatomie 1* (Třetí, upr). Praha: Grada.
- Čihák, R. (2013). *Anatomie 2* (Třetí, upr). Praha: Grada.
- da Silva, R. F., Prado, F. B., Caputo, I. G. C., Devito, K. L., Botelho, T. de L., & Júnior, E. D. (2009). The forensic importance of frontal sinus radiographs. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 16, 18–23.
- Dangar, K. . P., Pandya, A. M., Rathod, S. P., Tank, K. C., Akbari, V. J., & Solanki, S. V. (2012). Sexual Dimorphism of proximal epiphyseal breadth of tibia. *International Journal of Biological and Medical Research*, 3(1), 1331–1334.
- Darwin, C. (1872). *The descent of man, and selection in relation to sex*. New York: D. Appleton and Company.

- Dayal, M. R., Spocter, M. A., & Bidmos, M. A. (2008). An assessment of sex using the skull of black South Africans by discriminant function analysis. *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 59, 209–221.
- Dempf, R., & Eckert, A. W. (2010). Contouring the forehead and rhinoplasty in the feminization of the face in male-to-female transsexuals. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 38, 416–422.
- Dirkmaat, D. C. (2012). *A companion to forensic anthropology*. Malden: Wiley Blackwell.
- Dupej, J., Krajíček, V., Velemínská, J., & Pelikán, J. (2014). Statistical mesh shape analysis with nonlandmark nonrigid registration. *Eurographic Symposium on Geometry Processing*.
- Duque, C., & Casiano, R. (2005). Surgical anatomy and embryology of the frontal sinus. In *The frontal sinus* (pp. 21–31). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Elliott, M., & Collard, M. (2009). FORDISC and the determination of ancestry from cranial measurements. *Biology Letters*, 5, 849–852.
- Esteve-Altava, B., Vallès-Català, T., Guimerà, R., Sales-Pardo, M., & Rasskin-Gutman, D. (2017). Bone fusion in normal and pathological development is constrained by the network architecture of the human skull. *Scientific Reports*, 7(3376), 1–7.
- Faro, C., Benoit, B., Wegrzyn, P., Chaoui, R., & Nicolaidis, K. H. (2005). Three-dimensional sonographic description of the fetal frontal bones and metopic suture. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, 26, 618–621.
- Fatah, A., Shirley, N., Jantz, R., & Mahfouz, M. (2014). Improving sex estimation from crania using a novel three-dimensional quantitative method. *Journal of Forensic Sciences*, 59(3), 590–600.
- Ferembach, D., Schwidetzky, I., & Stloukal, M. (1980). Recommendations for age and sex diagnoses of skeletons. *Journal of Human Evolution*, 9(7), 517–549.
- Franklin, D., Cardini, A., Flavel, A., & Kuliukas, A. (2012). The application of traditional and geometric morphometric analyses for forensic quantification of sexual dimorphism: Preliminary investigations in a Western Australian population. *International Journal of Legal Medicine*, 126, 549–558.
- Freyer, D. W., & Wolpoff, M. H. (1985). Sexual Dimorphism. *Annual Review of Anthropology*, 14, 429–473.
- Gamba, T. D. O., Alves, M. C., & Haiter-Neto, F. (2016). Mandibular sexual dimorphism analysis in CBCT scans. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 38, 106–110.

- Gapert, R., Black, S., & Last, J. (2009a). Sex determination from the occipital condyle: Discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century british sample. *American Journal of Physical Anthropology*, 138, 384–394.
- Gapert, R., Black, S., & Last, J. (2009b). Sex detrmination from the foramen magnum: discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century British sample. *International Journal of Legal Medicine*, 123, 25–33.
- Garvin, H. M., & Ruff, C. B. (2012). Sexual dimorphism in skeletal browridge and chin morphologies determined using a new quantitative method. *American Journal of Physical Anthropology*, 147, 661–670.
- Garvin, H. M., Sholts, S. B., & Mosca, L. A. (2014). Sexual dimorphism in human cranial trait scores: Effects of population, age, and body size. *American Journal of Physical Anthropology*, 154, 259–269.
- Giles, E. (1964). Sex determination by discriminant function analysis of the mandible. *American Journal of Physical Anthropology*, 22, 129–136.
- Giles, E., & Elliot, O. (1963). Sex determination by discriminant function analysis of Crania. *Americna Journal of Physical Anthropology*, 21(1), 53–68.
- Gómez-Valdés, J. A., Quinto-Sánchez, M., Garmendia, A. M., Veleminska, J., Sánchez-Mejorada, G., & Bruzek, J. (2012). Comparison of methods to determine sex by evaluating the greater sciatic notch: Visual, angular and geometric morphometrics. *Forensic Science International*, 221, 156.e1-156.e7.
- Gonzalez, P. N., Bernal, V., & Perez, S. I. (2011). Analysis of sexual dimorphism of craniofacial traits using geometric morphometric techniques. *International Journal of Osteoarchaeology*, 21, 82–91.
- Govsa, F., Ozer, M. A., Pinar, Y., & Sezak, M. (2015). Increased osseous thickening of the inner surface of the frontal bone. *Turkish Neurosurgery*, 25(2), 224–230.
- Goyal, M., Acharya, A. B., Sattur, A. P., & Naikmasur, V. G. (2013). Are frontal sinuses useful indicators of sex? *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 20, 91–94.
- Graw, M. (2001). Significance of the classical morphological criteria for identifying gender using recent skulls. *Forensic Science Communications*, 3(1).
- Guerram, A., Minor, J. Le, Renger, S., & Guillaume, B. (2014). Brief communication : The size of the human frontal sinuses in adults presenting complete persistence of the metopic suture. *American Journal of Physical Anthropology*, 154(4), 621–627.

- Guyomarc'h, P., & Bruzek, J. (2011). Accuracy and reliability in sex determination from skulls: a comparison of Fordisc® 3.0 and the discriminant function analysis. *Forensic Science International*, 208, 180.e1-180.e6.
- Hanihara, K. (1959). Sex diagnosis of Japanese skulls and scapule by means of discriminant function. *The Journal of Anthropological Society of Nippon*, 66(4).
- Hochstein, L. A. E. (2014). *The frontal bone as a proxy for sex estimation in humans : a geometric morphometric analysis*. George Mason University.
- Inman, V., & Saunders, J. (1937). The ossification of the human frontal bone: With special reference to its presumed pre- and post-frontal elements. *Journal of Anatomy*, 71, 383–394.
- Isaza, J., Díaz, C. A., Bedoya, J. F., Monsalve, T., & Botella, M. C. (2014). Assessment of sex from endocranial cavity using volume-rendered CT scans in a sample from Medellín, Colombia. *Forensic Science International*, 234, 186.e1-186.e10.
- Işcan, M. Y. (2005). Forensic anthropology of sex and body size. *Forensic Science International*, 147, 107–112.
- Jackson, D. A. (1993). Stopping rules in principal components analysis: A comparison of heuristic and statistical approaches. *Ecology Society of America*, 74(8), 2204–2214.
- Jantz, R. L., Mahfouz, M., Shirley, N. R., & Fatah, E. A. (2013). *Improving Sex Estimation from Crania using 3-dimensional CT Scans*.
- Keen, J. A. (1950). A study of differences between male and female skulls. *American Journal of Physical Anthropology*, 8(1), 65–80.
- Kemkes-Grottenthaler, A. (2001). The reliability of forensic osteology - a case in point. *Forensic Science International*, 117, 65–72.
- Kemkes, A., & Göbel, T. (2006). Metric assessment of the “mastoid triangle” for sex determination: A validation study. *Journal of Forensic Sciences*, 51(5), 985–989.
- Kim, D.-I., Lee, U.-Y., Park, S.-O., Kwak, D.-S., & Han, S.-H. (2013). Identification using frontal sinus by three-dimensional reconstruction from computed tomography. *Journal of Forensic Sciences*, 58(1), 5–12.
- Kimmerle, E. H., Ross, A., & Slice, D. (2008). Sexual dimorphism in America: Geometric morphometric analysis of the craniofacial region. *Journal of Forensic Sciences*, 53(1), 54–57.

- Kjær, I., Pallisgaard, C., & Brock-Jacobsen, M. T. (2012). Frontal sinus dimensions can differ significantly between individuals within a monozygotic twin pair, indicating environmental influence on sinus sizes. *Acta Oto-Laryngologica*, 132, 988–994.
- Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- Kotěrová, A., Velemínská, J., Dupej, J., Brzobohatá, H., Pilný, A., & Brůžek, J. (2016). Disregarding population specificity: its influence on the sex assessment methods from the tibia. *International Journal of Legal Medicine*, 131(1), 251–261.
- Kranioti, E. F., & Apostol, M. A. (2015). Sexual dimorphism of the tibia in contemporary Greeks, Italians, and Spanish: forensic implications. *International Journal of Legal Medicine*, 129, 357–363.
- Kranioti, E. F., Vorniotakis, N., Galiatsou, C., Işcan, M. Y., & Michalodimitrakis, M. (2009). Sex identification and software development using digital femoral head radiographs, 189, 113.e1-113.e7.
- Krogman, W. M. (1962). *The human skeleton in forensic medicine*. Illinois: Charles C Thomas Publisher.
- Lee, M. K., Sakai, O., & Spiegel, J. H. (2010). CT measurement of the frontal sinus - Gender differences and implications for frontal cranioplasty. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 38, 494–500.
- Lee, U.-Y., Kim, I.-B., & Kwak, D.-S. (2015). Sex determination using discriminant analysis of upper and lower extremity bones: New approach using the volume and surface area of digital model. *Forensic Science International*, 253, 135.e1-135.e4.
- Lenroot, R. K., Gogtay, N., Greenstein, D. K., Wells, E. M., Wallace, G. L., Clasen, L. S., ... Giedd, J. N. (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. *NeuroImage*, 36, 1065–1073.
- Lewis, C., & Garvin, H. M. (2016). Reliability of the Walker cranial nonmetric method and implications for sex estimation. *Journal of Forensic Sciences*, 61(3), 743–751.
- Lieberman, D. E., McBratney, B. M., & Krovitz, G. (2002). The evolution and development of cranial form in Homo sapiens. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3), 1134–1139.

- Luts, J., Ojeda, F., Van de Plas Raf, R., De Moor, B., Van Huffel, S., & Suykens, J. A. K. (2010). A tutorial on support vector machine-based methods for classification problems in chemometrics. *Analytica Chimica Acta*, 665, 129–145.
- Madadin, M., Menezes, R. G., Al Dhafeeri, O., Kharoshah, M. A., Al Ibrahim, R., Nagesh, K. R., & Ramadan, S. U. (2015). Evaluation of the mastoid triangle for determining sexual dimorphism : A Saudi population based study. *Forensic Science International*.
- Madadin, M., Menezes, R. G., Al Saif, H. S., Abu Alola, H., Al Muhanna, A., Gullenpet, A. H., ... Al Dhafery, B. (2017). Morphometric evaluation of the foramen magnum for sex determination: A study from Saudi Arabia. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 46, 66–71.
- Mahakkanukrauh, P., Sinthubua, A., Prasitwattanaseree, S., Ruengdit, S., Singsuwan, P., Praneatpolgrang, S., & Duangto, P. (2015). Craniometric study for sex determination in a Thai population. *Anatomy & Cell Biology*, 48, 275–83.
- Malina, J., & kolektiv. (2009). *Antropologický slovník*. Brno: Akademické nakladatelství CERM.
- Meredith, H. (1959). Change in a dimension of the frontal bone during childhood and adolescence. *The Anatomical Record*, 134(4), 769–780.
- Mestekova, S., Bruzek, J., Velemínska, J., & Chaumoitre, K. (2015). A Test of the DSP Sexing Method on CT Images from a Modern French Sample. *Journal of Forensic Sciences*, 60(5), 1295–1299.
- Michel, J., Paganelli, A., Varoquaux, A., Piercecchi-Marti, M. D., Adalian, P., Leonetti, G., & Dessi, P. (2015). Determination of sex: Interest of frontal sinus 3D reconstructions. *Journal of Forensic Sciences*, 60(2), 269–273.
- Miracle, A. C., & Mukherji, S. K. (2009). Conebeam CT of the head and neck, part 2: Clinical applications. *American Journal of Neuroradiology*, 30(7), 1285–1292.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in Geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 36, 235–247.
- Molleson, T., Cruse, K., & Mays, S. (1998). Some sexually dimorphic features of the human juvenile. *Journal of Archaeological Science*, 25, 719–728.
- Morrison, D. F. (2005). Multivariate Analysis, Overview. In P. Armitage & T. Colton (Eds.), *Encyclopedia of Biostatistics*. John Wiley and Sons, Inc.

- Murail, P., Bruzek, J., Houët, F., & Cunha, E. (2005). DSP: A tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et Mémoires de La Société d'Anthropologie de Paris*, 17(3–4), 167–176.
- Musilová, B., Dupej, J., Velemínská, J., Chaumoitre, K., & Bružek, J. (2016). Exocranial surfaces for sex assessment of the human cranium. *Forensic Science International*.
- Mydlová, M., Dupej, J., Koudelová, J., & Velemínská, J. (2015). Sexual dimorphism of facial appearance in ageing human adults: A cross-sectional study. *Forensic Science International*, 257, 519.e1-519.e9.
- Myronenko, A., & Song, X. (2010). Point set registration: Coherent point drift. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(12), 2262–2275.
- Ogawa, Y., Imaizumi, K., Miyasaka, S., & Yoshino, M. (2013). Discriminant functions for sex estimation of modern Japanese skulls. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 20, 234–238.
- Osipov, B., Harvati, K., Nathana, D., Spanakis, K., Karantanas, A., & Kranioti, E. F. (2013). Sexual dimorphism of the bony labyrinth : A new age-independent method. *American Journal of Physical Anthropology*, 151(2), 290–301.
- Ousley, S., & Jantz, R. (2013). Fordisc 3: Third generation of computer-aided forensic anthropology. *Rechtsmedizin*, 23, 97–99.
- Özer, B. K., Özer, I., Sagir, M., & Gülec, E. (2014). Sex determination using the tibia in an ancient anatolian population. *Mediterranean Archeology and Archaometry*, 14(2), 329–336.
- Perlaza, N. A. (2014). Sex determination from the frontal bone: A geometric morphometric study. *Journal of Forensic Sciences*, 59(5), 1330–1332.
- Phenice, T. (1969). A newly developed visual method of sexing the os pubis. *American Journal of Physical Anthropology*, 30(2), 297–301.
- Pickering, R., & Bachman, D. (2009). *The use of forensic anthropology (Second Edition)* (2nd editio). Boca Raton: CRC Press.
- Pondé, J. M., Metzger, P., Amaral, G., Machado, M., & Prandini, M. (2003). Anatomic variations of the frontal sinus. *Minimally Invasive Neurosurgery*, 46, 29–32.
- Popich, G., & Smith, D. (1972). Fontanel: Range of normal size. *The Journal of Pediatrics*, 80(5), 749–752.

- Quatrehomme, G., Fronty, P., Sapanet, M., Grévin, G., Bailet, P., & Ollier, A. (1996). Identification by frontal sinus pattern in forensic anthropology. *Forensic Science International*, 83, 147–153.
- Ralls, K., & Mesnick, S. (2009). Sexual Dimorphism. In W. F. Perrin, B. Würsig, & J. G. M. Thewissen (Eds.), *Encyclopedia of marine mammals* (2nd ed., pp. 1005–1011). San Diego: Academic Press.
- Ramadan, S. U., Türkmen, N., Dolgut, N. A., Gökharman, D., Menezes, R. G., Kacar, M., & Koşar, U. (2010). Sex determination from measurements of the sternum and fourth rib using multislice computed tomography of the chest. *Forensic Science International*, 197, 120.e1-120.e5.
- Ramamoorthy, B., Pai, M. M., Prabhu, L. V., Muralimanju, B. V., & Rai, R. (2016). Assessment of craniometric traits in South Indian dry skulls for sex determination. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 37, 8–14.
- Robinson, M. S., & Bidmos, M. A. (2009). The skull and humerus in the determination of sex: Reliability of discriminant function equations. *Forensic Science International*, 186, 86.e1-86.e5.
- Rosas, A., & Bastir, M. (2002). Thin-plate spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology*, 117, 236–245.
- Roughgarden, J., Oishi, M., & Akcay, E. (2006). Reproductive social behavior: Cooperative games to replace sexual selection. *Science*, 311.
- Russell, M. D., Brown, T., Garn, S. M., Giris, F., Turkel, S., Ya, M., ... Russell, D. (1985). The supraorbital torus: A most remarkable peculiarity, 26(3), 337–360.
- Sai Kiran, C., Ramaswamy, P., & Khaitan, T. (2014). Frontal sinus index – A new tool for sex determination. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 2, 77–79.
- Sargi, Z. B., & Casiano, R. R. (2007). Surgical anatomy of the paranasal sinuses. In S. E. Kountakis & T. M. Önerci (Eds.), *Rhinologic and sleep apnea surgical techniques* (1st ed., pp. 17–26). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Shapiro, A. S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3/4), 591–611.
- Shearer, B. M., Sholts, S. B., Garvin, H. M., & Wärmländer, S. K. T. S. (2012). Sexual dimorphism in human browridge volume measured from 3D models of dry crania: A new digital morphometrics approach. *Forensic Science International*, 222, 400.e1-400.e5.
- Scheuer, L., & Black, S. (2004). *The juvenile skeleton*. Academic Press.

- Simpson, S. W., Quade, J., Levin, N. E., Butler, R., Dupont-Nivet, G., Everett, M., & Semaw, S. (2008). A female *Homo erectus* pelvis from Gona, Ethiopia. *Science*, 322(14), 1089–1092.
- Slatkin, M. (1984). Ecological causes of sexual dimorphism, 38(3), 622–630.
- Slice, D. (2007). Geometric Morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, 36, 261–281.
- Spradley, M. K., & Jantz, R. L. (2011). Sex estimation in forensic anthropology: skull versus postcranial elements. *Journal of Forensic Sciences*, 56(2), 289–296.
- Steyn, M., & Patriquin, M. L. (2009). Osteometric sex determination from the pelvis—Does population specificity matter? *Forensic Science International*, 191, 113.e1–113.e5.
- Stone, A. C., Milner, G. R., Paäbo, S., & Stoneking, M. (1996). Sex determination of ancient human skeletons using DNA. *American Journal of Physical Anthropology*, 99(2), 231–238.
- Suazo, G. I., & Zavado, D. (2012). Age effect in the morphological traits performance for sex determination in human skulls and mandibles. *Int. J. Morphol*, 30(1), 296–301.
- Suazo, G. I., Zavado, D. A., & Smith, R. L. (2009). Performance evaluation as a diagnostic test for traditional methods for forensic identification of sex. *International Journal of Morphology*, 27(2), 381–386.
- Ščesnaite-Jerdiakova, A., Pliss, L., Gerhards, G., Gordina, E. P., Gustina, A., Pole, I., ... Ranka, R. (2015). Morphological characterisation and molecular sex determination of human remains from the 18th–17th centuries in Latvia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*, 69(1/2), 8–13.
- Šmahel, Z. (2001). *Principy, teorie a metody auxologie*. Praha: Karolinum.
- Thorek, P. (1985). Skull. In *Anatomy in surgery* (3rd ed.). New York: Springer-Verlag New York.
- Uberlaker, D. (1998). *Book Review: Fordisc 2.0: Personal computer forensic discriminant functions*. *International Journal of Osteoarchaeology* (Vol. 8).
- Uberlaker, D., Ross, A., & Graver, S. (2002). Application of forensic discriminant functions to a Spanish cranial sample, 4(3).
- Urban, J. E., Weaver, A. A., Lillie, E. M., Maldjian, J. A., Whitlow, C. T., & Stitzel, J. D. (2014). Evaluation of morphological changes in the adult skull with age and sex. *Journal of Anatomy*, 229(6), 838–846.

- Uthman, A. T., AL-Rawi, N. H., Al-Naaimi, A. S., Tawfeeq, A. S., & Suhail, E. H. (2010). Evaluation of frontal sinus and skull measurements using spiral CT scanning: An aid in unknown person identification. *Forensic Science International*, 197, 124.e1-124.e7.
- Vapnik, V., Golowich, S. E., & Smola, A. (1997). Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 281--287.
- Velemínská, J., Krajíček, V., Dupej, J., Gómez-Valdés, J. A., Velemínský, P., Šefčáková, A., ... Brůžek, J. (2013). Geometric morphometrics and sexual dimorphism of the greater sciatic notch in adults from two skeletal collections: The accuracy and reliability of sex classification. *American Journal of Physical Anthropology*, 152, 558–565.
- Walker, P. L. (2008). Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. *American Journal of Physical Anthropology*, 136, 39–50.
- Walrath, D. E., Turner, P., & Bruzek, J. (2004). Reliability test of the visual assessment of cranial traits for sex determination. *American Journal of Physical Anthropology*, 125(2), 132–137.
- Wells, J. C. K. (2007). Sexual dimorphism of body composition. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*, 21(3), 415–430.
- White, T. D., Black, M. T., & Folkens, P. A. (2011). *Human osteology* (3rd ed.). Academic Press.
- White, T. D., & Folkens, P. A. (2005). *The human bone manual*. Academic Press.
- Williams, B. A., & Rogers, T. L. (2006). Evaluating the accuracy and precision of cranial morphological traits for sex determination. *Journal of Forensic Sciences*, 51(4), 729–735.
- Wood, W., & Eagly, A. H. (2002). A cross-cultural analysis of the behavior of women and men: implications for the origins of sex differences, 128(5), 699–727.
- Young, R. (1957). Postnatal growth of the frontal and parietal bones in white males. *American Journal of Physical Anthropology*, 15(3), 367–386.
- Zendlich, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric Morphometrics for Biologist*. Academic Press.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Složení současné české populace	34
Tabulka 2. Seznam landmarků a jejich popis	36
Tabulka 3. Variabilita formy v prvních deseti hlavních komponentách	41
Tabulka 4. Variabilita tvaru v prvních deseti hlavních komponentách	47
Tabulka 5. Statistická charakteristika objemu čelních dutin	60
Tabulka 6. Statistická charakteristika povrchu čelních dutin	61
Tabulka 7. Minimální a maximální hodnoty, průměr a medián ploch čelních kostí, které jsou k povrchu koule blíže než 1 mm	65
Tabulka 8. Minimální a maximální hodnoty, průměr a medián poloměru křivosti čelních kostí	66
Tabulka 9. Výsledky nejúspěšnějších klasifikačních modelů založených na jednotlivých proměnných předložených v práci	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Zobrazení pohlavního dimorfismu na pánvi	13
Obrázek 2. Proporce ischiopubického segmentu	14
Obrázek 3. Obecné zobrazení pohlavního dimorfismu na lebce	17
Obrázek 4. Morfologie čelní kosti	23
Obrázek 5. Vývoj pravé čelní kosti	27
Obrázek 6. Obecné zobrazení pohlavního dimorfismu na lebce, zejména na čelní kosti	29
Obrázek 7. Segmentace lebky z CT snímku	35
Obrázek 8. Zadávané landmarky na vnější povrch čelní kosti	36
Obrázek 9. Ukázka čelních dutin dvou různých jedinců	37
Obrázek 10. Suťový graf pro formu vnějšího povrchu čelní kosti s použitím nástroje „broken stick“	42
Obrázek 11. Rozložení variability v PC1 a PC2 pro formu vnějšího povrchu čelní kosti	43
Obrázek 12. Změny formy čelní kosti vyjádřené PC1	44
Obrázek 13. Změny formy čelní kosti vyjádřené PC2	45
Obrázek 14. Změny formy čelní kosti vyjádřené PC3	46
Obrázek 15. Suťový graf pro tvar vnějšího povrchu čelní kosti s použitím nástroje „broken stick“	47
Obrázek 16. Rozložení variability v PC1 a PC2 pro tvar vnějšího povrchu čelní kosti	48
Obrázek 17. Změny tvaru čelní kosti vyjádřené PC1	49
Obrázek 18. Změny tvaru čelní kosti vyjádřené PC2	50
Obrázek 19. Znázornění velikosti (centroid size) čelních kostí	51
Obrázek 20. Barevná škála charakterizující rozložení rozdílů ve formě na barevných mapách (forma)	52
Obrázek 21. Vizualizace rozdílů ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled)	53

Obrázek 22. Vizualizace rozdílů ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (laterální pohled).....	53
Obrázek 23. Vizualizace rozdílů ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola)	54
Obrázek 24. Vizualizace signifikantních oblastí ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled).....	55
Obrázek 25. Vizualizace signifikantních oblastí ve formě vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola).....	55
Obrázek 26. Barevná škála charakterizující rozložení rozdílů v tvaru čelních kostí na barevných mapách (tvar).....	56
Obrázek 27. Vizualizace rozdílů ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled).....	57
Obrázek 28. Vizualizace rozdílů ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (laterální pohled).....	57
Obrázek 29. Vizualizace rozdílů ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola)	58
Obrázek 30. Vizualizace signifikantních oblastí ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (frontální pohled).....	59
Obrázek 31. Vizualizace signifikantních oblastí ve tvaru vnějšího povrchu čelní kosti (pohled zdola).....	59
Obrázek 32. Rozdělení objemu čelních dutin (v mm ³) mezi ženami a muži.....	61
Obrázek 33. Rozdělení povrchu čelních dutin (v mm ²) mezi ženami a muži.....	62
Obrázek 34. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě formy vnějšího povrchu čelní kosti	63
Obrázek 35. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě tvaru vnějšího povrchu čelní kosti	64
Obrázek 36. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě současného použití formy vnějšího povrchu čelní kosti a čelních dutin	67
Obrázek 37. Úspěšnost metody pro odhad pohlaví na základě současného použití tvaru vnějšího povrchu čelní kosti a čelních dutin	68